

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Научно-технический журнал

Основан в 2010 г.

Учредитель

Белорусский национальный технический университет

Выходит 4 раза в год

Журнал включен в базы данных:

Web of Science Core Collection (ESCI),
EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, РИНЦ,
ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

Том 16

№ 2

2025

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Гусев О.К., д.т.н., профессор, проректор Белорусского национального технического университета
(г. Минск, Беларусь)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Маляревич А.М., член-корреспондент НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой
«Лазерная техника и технология» Белорусского национального технического университета (г. Минск,
Беларусь)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Алексеев В.А., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Физика и оптотехника» Ижевского
государственного технического университета имени М.Т. Калашиникова (г. Ижевск, Россия)

Анищик В.М., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры физики твёрдого тела и нанотехнологий
Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)

Бубулис А., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Научного центра мехатроники Каунасского
технологического университета (г. Каунас, Литва)

Вайн А.А., д.т.н., профессор Тартуского университета (г. Тарту, Эстония)

Виба Я., член-корреспондент Латвийской академии наук, д.т.н., профессор, Институт механики и
машиностроения Рижского технического университета (г. Рига, Латвия)

Гуттен М., д.т.н., заведующий кафедрой метрологии и прикладной электротехники Жилинского
университета (г. Жилина, Словакия)

Дмитриев С.М., д.т.н., профессор, ректор Нижегородского государственного технического
университета имени Р.Е. Алексеева (г. Нижний Новгород, Россия)

Дэнилак С., профессор Производственно-исследовательского центра Технологического института
штата Джорджия (г. Атланта, США)

Жарин А.Л., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника и
технологии» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

Жуковский П., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электрических аппаратов и техники высоких
напряжений Люблинского технического университета (г. Люблин, Польша)

Колтунович Т.Н., д.т.н., профессор, Люблинский технический университет (г. Люблин, Польша)

Комаров Ф.Ф., академик НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией элионики Института прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)

Кучинский П.В., д.ф.-м.н., доцент, директор Института прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)

Кэмп А., профессор Института фотоники Страсклайдского университета (г. Глазго, Великобритания)

Матеос Х., к.ф.-м.н., доцент, университет Ровира и Вирхилий (г. Таррагона, Испания)

Пилипенко В.А., член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор, заместитель директора ГЦ «Белмикроанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Беларусь)

Плескачевский Ю.М., член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор (г. Минск, Беларусь)

Распопов В.Я., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Приборы управления» Тульского государственного университета (г. Тула, Россия)

Це Ли, заместитель директора Северо-Восточного НИИ техники датчиков (г. Харбин, КНР)

Чижик С.А., академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор, Первый заместитель Председателя Президиума НАН Беларуси, заведующий кафедрой «Микро- и нанотехника» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

Шкадаревич А.П., академик НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, директор НТЦ «ЛЭМТ» Белорусского оптико-механического объединения (г. Минск, Беларусь)

Юмашев К.В., д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник НИЦ оптических материалов и технологий филиала Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательский политехнический институт» (г. Минск, Беларусь)

**Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 25 июня 2010 г.
Регистрационный номер 1372**

В соответствии с решением ВАК от 08.07.2011 г. №13/1 журнал включён в Перечень научных изданий для опубликования результатов диссертационных исследований;
научное направление: **технические (приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы; электроника; физика); физико-математические (приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы; электроника; физика)**
(приказ ВАК Республики Беларусь от 06.02.2024 г. №30 с изменениями от 23.05.2024 г. №124)

Подписка осуществляется через почтовые отделения связи по «Каталогу газет и журналов Республики Беларусь» (подписные индексы – 74835; 748352);
в Российской Федерации – через подписные каталоги:
ООО «Прессинформ», ООО «Кризйтив Сервис Бэнд», ООО «Екатеринбург-Опт», ООО «Глобалпресс»

Ведущий научный редактор: Шахлевич Л.Н.
Технический редактор: Чабарова О.Л.

Набор и вёрстка выполнены в редакции журнала «Приборы и методы измерений».
Подписано в печать. 2025. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная.
Гарнитура Times New Roman. Печать цифровая. Усл. печ. л. 11,39. Уч.-изд. л. 7,52. Тираж 50 экз.
Дата выхода в свет: . Заказ № .

Отпечатано в Белорусском национальном техническом университете. ЛП № 38200000006896 от 03.03.2014.
Пр-т Независимости, 65, 220013, г. Минск

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

Белорусский национальный технический университет
пр-т Независимости, 65, корп. 17, комн. 432,
220013, г. Минск, Республика Беларусь,
тел.: +375 (17) 293 96 67, факс: +375 (17) 292 67 94
e-mail: pimi@bntu.by
<http://pimi.bntu.by>

DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENTS

Scientific and Engineering Journal

Founded in 2010

Founder
Belarusian National Technical University

Issued four times a year

The Journal is included in the following databases:
Web of Science Core Collection (ESCI),
EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar,
RISC, Lan, CyberLeninka, Socionet

Volume 16

№ 2

2025

EDITOR-IN-CHIEF

Oleg K. Gusev, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Vice-Rector of Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

Aliaksandr M. Malyarevich, *Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Laser Equipment and Technology Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

EDITORIAL BOARD

Vladimir A. Alekseev, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Physics and Optical Engineering, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russia)*

Victor M. Anishchik, *Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Department of Solid State Physics and Nanotechnology, Belarusian State University (Minsk, Belarus)*

Algimantas Bubulis, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Kaunas University of Technology (Kaunas, Lithuania)*

Arvid A. Vain, *Doctor of Science (Engineering), Professor, University of Tartu (Tartu, Estonia)*

Janis Viba, *Corresponding Member of the Latvian Academy of Sciences, Doctor of Science (Engineering), Professor, Institute of Mechanics and Mechanical Engineering, Riga Technical University (Riga, Latvia)*

Miroslav Gutten, *Doctor of Science (Engineering), Head of Department of Metrology and Applied Electrical Engineering, University of Žilina (Žilina, Slovakia)*

Sergei M. Dmitriev, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Rector of R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University (Nizhny Novgorod, Russia)*

Steven Danyluk, *PhD, Professor, Production and Research Center, Georgia Institute of Technology (Atlanta, USA)*

Anatoly L. Zharin, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Information and Measuring Technologies Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

Pawel Żukowski, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Department of Electrical Devices and High Voltages Technology, Lublin University of Technology (Lublin, Poland)*

Tomasz N. Koltunowicz, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Lublin University of Technology (Lublin, Poland)*

Fadey F. Komarov, *Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Elionics Laboratory, A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University (Minsk, Belarus)*

Petr V. Kuchynski, *Doctor of Science (Physics and Mathematics), Director of A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University (Minsk, Belarus)*

Alan Kemp, *PhD, Professor, Institute of Photonics, University of Strathclyde (Glasgow, United Kingdom)*

Xavier Mateos, *PhD, Associate Professor, Rovira i Virgili University (Tarragona, Spain)*

Vladimir A. Pilipenko, *Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, Deputy Director of the State Center "Belmicroanalysis" of JSC "INTEGRAL" – "INTEGRAL" Holding Managing Company (Minsk, Belarus)*

Yuriy M. Pleskachevsky, *Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor (Minsk, Belarus)*

Vladimir Ya. Raspopov, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Control Devices Department, Tula State University (Tula, Russia)*

Tse Li, *Deputy Director of Northeast Scientific Research Institute of Sensor Technology (Harbin, China)*

Sergei A. Chizhik, *Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Professor, Doctor of Science (Engineering), the First Vice Chairman of the Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Head of Micro- and Nanotechnics Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

Alexey P. Shkadarevich, *Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Director of the Scientific and Technical Center "LEMT" of the BelOMO (Minsk, Belarus)*

Konstantin V. Yumashev, *Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Principal Research Scientist of Research Centre for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

ADDRESS:

Belarusian National Technical University
Nezavisimosty Ave., 65, Building 17, Room 432
Minsk 220013, Belarus
Tel.: +375 (17) 293 96 67, fax: +375 (17) 292 67 94
e-mail: pimi@bntu.by
<http://pimi.bntu.by>

СОДЕРЖАНИЕ

Средства измерений

*В.К. Ксенович, В.А. Доросинец, М.А. Самарина, И.А. Свито, Н.А. Поклонский, Д.В. Адамчук,
Г. Абдурахманов*

Неупорядоченные плёнки оксидов олова для термоэлектрических приложений: корреляция между микроструктурой, электропроводностью и коэффициентом Зеебека (in English)..... 87

П.А. Хмарский

Эволюционный алгоритм искусственного интеллекта для оптимизации обнаружения фаз шага по данным трёхосевого акселерометра, размещённого на стопе..... 98

Методы измерений, контроля, диагностики

А.Р. Баев, А.В. Воробей, А.Л. Майоров, М.В. Асадчая, Н.В. Деленковский

Дистанционное возбуждение вращающихся поверхностных волн в телах с цилиндрической и сферической поверхностью применительно к ультразвуковому контролю (in English)..... 109

В.С. Баранова, А.А. Спиридонов, Д.В. Ушаков, В.А. Саечников

Метод начального определения орбиты космического объекта по ограниченным данным угловых оптических измерений..... 121

*В.А. Лапицкая, Т.А. Кузнецова, Б. Вархолински, А.В. Хабарова, Т.В. Гамзелева, А. Гилевич,
С.А. Чижик*

Контроль трибологических характеристик износостойких покрытий AlCrBN методом наноскретчтестирования (in English)..... 133

А.В. Борздов, В.М. Борздов, Д.Н. Буйновский, А.Н. Петлицкий

Моделирование методом Монте-Карло фотоотклика в кремниевых фотодиодах с *p-n*-переходом и *p-i-n*-структурой (in English)..... 140

П.В. Гуляев

Коррекция влияния помех на результаты зондовой микроскопии вытянутых объектов с использованием прогнозных оценок рельефа..... 147

И.Л. Громыко, В.Н. Галушко

Метод неразрушающего контроля состояния однофазных и трёхфазных трансформаторов на основе частотных характеристик..... 158

А.Н. Осипов, И.О. Хазановский, А.В. Пацев, С.В. Пацев

Взаимосвязь оптимального значения частоты электростимуляции, величины максимума фазового сдвига и усилия, развиваемого мышцей..... 168

CONTENTS

Measuring Instruments

V.K. Ksenevich, V.A. Dorosinets, M.A. Samarina, N.A. Poklonski, I.A. Svito, D.V. Adamchuk, G. Abdurakhmanov

Disordered Tin Oxide Films for Thermoelectric Applications: Correlation between Microstructure, Electrical Conductivity and Seebeck Coefficient.....	87
---	-----------

P.A. Khmarskiy

Evolutionary Artificial Intelligence Algorithm for Optimizing Step Phase Detection Based on Foot-Mounted Triaxial Accelerometer Data (in Russian).....	98
---	-----------

Methods of Measurements, Monitoring, Diagnostics

A.R. Baev, A.V. Vorobey, A.L. Mayorov, M.V. Asadchaya, N.V. Delenkovsky

Distant Excitation of Rotating Surface Waves in Bodies with Cylindrical and Spherical Surface as Applied to Ultrasound Testing.....	109
--	------------

V.S. Baranova, A.A. Spiridonov, D.V. Ushakov, V.A. Saetchnikov

Initial Orbit Determination of a Space Object from Limited Angular Optical Measurements (in Russian).....	121
--	------------

V.A. Lapitskaya, T.A. Kuznetsova, B. Warcholinski, A.V. Khabarova, T.V. Hamzeleva, A. Gilewicz, S.A. Chizhik

Control of Tribological Characteristics of Wear-Resistant AlCrBN Coatings by Nanoscratch Testing.....	133
--	------------

A.V. Borzdov, V.M. Borzdov, D.N. Buinouski, A.N. Petlitsky

Monte Carlo Simulation of Photoresponse in Silicon Photodiodes with <i>p-n</i>-Junction and <i>p-i-n</i>-Structure.....	140
--	------------

P.V. Gulyaev

Correction of Disturbances Influence on Results of Elongated Objects's Probe Microscopy Using Predictive Relief Estimates (in Russian).....	147
--	------------

I.L. Hramyka, V.N. Galushko

Method of Non-Destructive Control of Single-Phase and Three-Phase Transformers's Condition on the Basis of Frequency Characteristics (in Russian).....	158
---	------------

A.N. Osipov, I.O. Khazanovsky, A.V. Paceev, S.V. Paceev

Relationship between the Electrical Stimulation Frequency Optimal Value and the Magnitude of the Maximum Phase Shift, and the Force Developed by the Muscle (in Russian).....	168
--	------------

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-87-97

Disordered Tin Oxide Films for Thermoelectric Applications: Correlation between Microstructure, Electrical Conductivity and Seebeck Coefficient

V.K. Ksenevich¹, V.A. Dorosinets¹, M.A. Samarina¹, N.A. Poklonski¹, I.A. Svito¹,
D.V. Adamchuk², G. Abdurakhmanov³

¹Belarusian State University,
Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus

²Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University,
Bobruiskaya str., 11, Minsk 220030, Belarus

³National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek,
Universitetskaya str., 4, Tashkent 100174, Uzbekistan

Received 24.04.2025

Accepted for publication 05.06.2025

Abstract

The aim of the work was to establish a correlation between structural, electrical and thermoelectric properties of the disordered tin oxide films to study the possibility of their further applications as materials for thermoelectric converters. Disordered multiphase tin oxide films were synthesized by magnetron sputtering of tin onto glass substrates in argon plasma and subsequent two-stage annealing in air. The structural, electrical and thermoelectric properties of the films were varied by changing the temperature at the 2nd stage of annealing in the range of 350–450 °C. It was found that the films synthesized at a temperature of 350 °C during the 2nd stage of annealing procedure have an amorphous structure and are characterized by the highest value of specific electrical conductivity $\sigma \approx 28.5$ S/m. Samples fabricated at temperatures 400 and 450 °C during the 2nd stage of annealing are characterized by polycrystalline multiphase structure with both stoichiometric (SnO, SnO₂) and non-stoichiometric (Sn₂O₃ and Sn₃O₄) phases of tin oxides in their composition (with prevailing of SnO₂ phase for the samples annealed at 450 °C). It was found that these samples are characterized by a higher value of the Seebeck coefficient S (–156 μ V/K and –163 μ V/K, respectively) compared to the amorphous films, for which the value $S = -90$ μ V/K. It was found that the electrical conductivity of both amorphous and polycrystalline tin oxide films in the temperature range of ≈ 80 –300 K can be described within the frame of a model that assumes the activation of electrons from impurity levels in the band gap associated with oxygen vacancies in different charge states. It was demonstrated that for all types of the samples, the Pisarenko's formula can be applied to evaluate the relationship between the Seebeck coefficient S and the position of the Fermi level E_F if the parameter $r < -2$.

Keywords: magnetron sputtering, tin oxide films, electrical conductivity, thermal activation, thermoEMF coefficient

Адрес для переписки:

Ксеневи́ч В.К.
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: ksenevich@bsu.by

Address for correspondence:

Ksenevich V.K.
Belarusian State University,
Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: ksenevich@bsu.by

Для цитирования:

V.K. Ksenevich, V.A. Dorosinets, M.A. Samarina, N.A. Poklonski,
I.A. Svito, D.V. Adamchuk, G. Abdurakhmanov.
Disordered Tin Oxide Films for Thermoelectric Applications:
Correlation between Microstructure, Electrical Conductivity and
Seebeck Coefficient.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 2. С. 87–97.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-87-97

For citation:

Ksenevich VK, Dorosinets VA, Samarina MA, Poklonski NA, Svito IA,
Adamchuk DV, Abdurakhmanov G.
Disordered Tin Oxide Films for Thermoelectric Applications:
Correlation between Microstructure, Electrical Conductivity and
Seebeck Coefficient.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(2):87–97.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-87-97

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-87-97

Неупорядоченные плёнки оксидов олова для термоэлектрических применений: корреляция между микроструктурой, электропроводностью и коэффициентом Зеебека

В.К. Ксеневиц¹, В.А. Доросинец¹, М.А. Самарина¹, Н.А. Поклонский¹, И.А. Свито¹,
Д.В. Адамчук², Г. Абдурахманов³

¹Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь

²Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета,
ул. Бобруйская, 11, г. Минск 220030, Беларусь

³Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека,
ул. Университетская, 4, г. Ташкент 100174, Узбекистан

Поступила 24.04.2025

Принята к печати 05.06.2025

Цель работы – установление взаимосвязи между структурными, электрическими и термоэлектрическими свойствами неупорядоченных плёнок оксидов олова для определения возможности дальнейшего их применения в качестве материалов для термоэлектрических преобразователей. Неупорядоченные многофазные плёнки оксидов олова синтезированы методом магнетронного распыления олова на стеклянные подложки в плазме аргона с последующим двухстадийным отжигом на воздухе. Структурные, электрические и термоэлектрические свойства плёнок варьировались посредством изменения температуры на 2-й стадии отжига в диапазоне 350–450 °С. Установлено, что плёнки, синтезированные при температуре 350 °С на 2-й стадии отжига, имеют рентгеноаморфную структуру и характеризуются наибольшей величиной удельной электропроводности $\sigma \approx 28,5$ См/м. Структура образцов, полученных при температурах 400 и 450 °С на 2-й стадии отжига, является поликристаллической многофазной, с наличием в их составе как стехиометрических (SnO , SnO_2), так и нестехиометрических (Sn_2O_3 и Sn_3O_4) фаз оксидов олова (с преобладанием фазы SnO_2 при отжиге при 450 °С). При этом эти образцы характеризуются большей величиной коэффициента Зеебека S (–156 мкВ/К и –163 мкВ/К соответственно) по сравнению с рентгеноаморфными плёнками, для которых величина $S = -90$ мкВ/К. Установлено, что электропроводность как аморфных, так и поликристаллических плёнок оксидов олова в диапазоне температур $\approx 80\text{--}300$ К может быть описана в рамках модели, предполагающей активацию электронов с примесных уровней в запрещённой зоне, связанных с кислородными вакансиями в различных зарядовых состояниях. Показано, что для всех исследованных образцов для оценки взаимосвязи между коэффициентом Зеебека S и положением уровня Ферми E_F может быть применена формула Писаренко при условии, что параметр $r < -2$.

Ключевые слова: магнетронное распыление, плёнки оксидов олова, электропроводность, термическая активация, коэффициент термоЭДС

Адрес для переписки:

Ксеневиц В.К.
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: ksenevich@bsu.by

Address for correspondence:

Ksenevich V.K.
Belarusian State University,
Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: ksenevich@bsu.by

Для цитирования:

V.K. Ksenevich, V.A. Dorosinets, M.A. Samarina, N.A. Poklonski,
I.A. Svito, D.V. Adamchuk, G. Abdurakhmanov.
Disordered Tin Oxide Films for Thermoelectric Applications:
Correlation between Microstructure, Electrical Conductivity and
Seebeck Coefficient.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 2. С. 87–97.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-87-97

For citation:

Ksenevich VK, Dorosinets VA, Samarina MA, Poklonski NA, Svito IA,
Adamchuk DV, Abdurakhmanov G.
Disordered Tin Oxide Films for Thermoelectric Applications:
Correlation between Microstructure, Electrical Conductivity and
Seebeck Coefficient.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(2):87–97.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-87-97

Introduction

Thermoelectric (TE) generators are used for recovery of electrical energy from waste heat. Research in this field has grown significantly over the past decades due to fossil energy resource depletion. Solid-state thermoelectric energy converters are used as sources of electricity in portable devices, as well as in electronic, medical, scientific equipment, on spacecraft, etc. [1, 2].

The efficiency of TE devices is estimated by the dimensionless parameter of thermoelectric figure of merit:

$$ZT = S^2 \sigma T / \kappa, \quad (1)$$

where S , σ and κ are the Seebeck coefficient, electrical and thermal conductivity of the TE material, respectively; T is the operating temperature or average temperature $(T_1 + T_2)/2$ of the TE converter; T_1 and T_2 are the temperatures of its hot and cold contacts, respectively [3].

Parameters of Seebeck coefficient S and electrical conductivity σ in the numerator of Eq. (1) are determined only by the electronic properties of materials, therefore they are often combined into the quantity $PF = S^2 \sigma$, called "Power factor". The value of thermal conductivity κ in the denominator of Eq. (1) can be considered as a sum of 2 terms [3]:

$$\kappa = \kappa_L + \kappa_e, \quad (2)$$

where κ_L and κ_e are the contributions from the lattice and electronic component of heat conductivity.

According to (1), it is obvious, that for high efficiency of heat to electricity conversion TE materials should have a high electrical conductivity σ , a high Seebeck coefficient S , and a low thermal conductivity κ .

Increasing the value of thermoelectric figure of merit of thermoelectric materials is a rather complicated task, requiring the fulfillment of contradictory conditions (increasing electrical conductivity while simultaneously reducing thermal conductivity).

In order to achieve maximum figure of merit value highly doped semiconductors and semimetals are usually used as a thermoelectric materials due to optimal relations between values of electrical conductivity σ , thermal conductivity κ and Seebeck coefficient S in them [4]. However, non-degenerate electronic materials can be characterized by high figure of merit value as well [4].

Possibility of high values of Seebeck coefficient and figure of merit in disordered materials near

metal–insulator transition is demonstrated in [5]. In such materials electrical conductivity is explained by transfer of localized electrons in the vicinity of the Fermi level.

The disadvantage of using non-degenerate semiconductors as TE materials is related to their low electrical conductivity. From the other side these materials are characterized by higher value of Seebeck coefficient S and low value of electronic term of the thermal conductivity κ_e . For these materials value of lattice term of heat conductivity κ_L can be comparable or even higher than the parameter κ_e . That is why one of the efficient methods to increase the figure of merit of TE materials is to reduce their lattice term of the thermal conductivity κ_L , characterizing the transfer of heat energy by phonons.

One of the most successful strategies for fabrication of TE materials with low value of the lattice thermal conductivity is the synthesis of structurally inhomogeneous samples [3, 6, 7]. Nanostructured materials (quantum wires, quantum dots, quantum wells) as well as materials with different types of nanoscale inclusions can be used as a materials with low κ_L value. For example, it was found that κ_L value of Si nanowire is much times less than lattice thermal conductivity of bulk Si (2 W/m·K vs 87.3 W/m·K respectively) [8]. However, for the fabrication of ordered low-dimensional structures a complicated and expensive technological equipment is required. Therefore, technologies based on the synthesis of non-homogeneous semiconductors as well as on the introducing of different types of point, linear and planar defects into the film and bulk semiconductors are considered as effective methods for the fabrication of TE materials with low lattice thermal conductivity value [9]. Mean free path of phonons can be reduced due to the scattering by point defects, dislocations, crystallite boundaries and nanoparticles of various phases [9]. It was found, for example, that nanocrystalline Si have much lower value of $\kappa_L = 6.3$ W/m·K in comparison with the bulk Si [10].

Widely used at present time commercial TE generators contain either expensive (Bi, Te, Ag and Se) or toxic (Pb, Hg) elements [11–13]. Besides that, chalcogenides are unstable in air and can be decomposed at relatively low temperatures. Therefore, protection from the influence of atmosphere for TE generators based on chalcogenides is required. As a result, manufacturing technology of such devices becomes more complicated and their price is increased.

As one of possible alternative to chalcogenides the metal oxides are considered [14, 15]. These materials are characterized by low cost, wide availability, environmental friendliness and stability at high temperatures. This explains their wide application in optoelectronics, photovoltaics, sensorics etc. One of the most widely used metal oxide is tin dioxide SnO_2 . In the stoichiometric composition SnO_2 is a wide band gap ($E_g = 3.6$ eV) semiconductor characterized by very low electrical conductivity σ [16]. Increasing of parameter σ can be achieved not only by doping, but by means of introducing of oxygen vacancies as a source of electrons during synthesis process. It is known that oxygen vacancies introduce shallow donor levels in the band gap of SnO_2 [17]. It is possible to synthesize tin dioxide samples with high concentration of electrons only by means of variation of technological procedure parameters resulting in fabrication of electrically degenerate semiconductors without need for additional atomic doping [18]. Tin oxide thin films have advantages in comparison with bulk oxide materials due to possibility to tune concentration of necessary defects by more controllable way.

Previous studies of thermoelectric properties of tin monoxide SnO [19–21] and tin dioxide SnO_2 [20–26] films have shown that these materials can be considered as perspective candidates for development of thermoelectric converters on their basis. A major challenge in producing efficient thermoelectric generators using these materials is their high lattice thermal conductivity (κ_L), arising from the strong ionic bonds in oxides and the low atomic mass of oxygen atoms.

Analysis of thermoelectric properties of tin monoxide and tin dioxide was carried out in [21]. In particular, the similarity of the electronic vibrational states of SnO and SnSe (characterized by high value of $ZT = 2.6$ at 923 K) was noted. Such high value of ZT in SnSe can be explained by extremely low value of the electron component of thermal conductivity $\kappa_e = 0.23$ W/m·K due to strong lattice anharmonicity caused by the bound chemically active electron pairs arising as a result of the interaction of the $\text{Sn}(5p)$ state and the antibonding state $\text{Sn}(5s)\text{-Se}(p)$ [27]. Similar to selenium, oxygen is also in group 6 of the periodic table, which suggests that SnO contains a similar bound electron pair as found in SnSe . As a thermoelectric material, SnO presents several advantages compared to SnSe , particularly considering selenium's high toxicity and limited production

volumes. Research [20] shows the feasibility of developing thermoelectric touch sensors using p -type SnO_x films.

It should be noted that amorphous tin oxides show promise as potential thermoelectric materials [15]. These materials exhibit high electron mobility due to the overlapping of spherically symmetric $\text{Sn } 5s$ orbitals. Consequently, amorphous SnO_x samples can achieve higher electrical conductivity σ compared to their crystalline counterparts. Moreover, the disordered structure of amorphous samples results in lower thermal conductivity κ than that observed in crystalline materials of identical chemical composition.

While the thermoelectric parameters and their relationship with electrical conductivity in crystalline materials are described by well-known formulas [28], structural disorder significantly affects both the electrical conductivity and the Seebeck coefficient S of thermoelectrical materials. Our efforts in this work were focused on the investigation of the electrical conductivity and Seebeck coefficient S of undoped tin oxides films with different disorder degree and various phase composition. Previously, we developed a method of fabrication of tin oxide films [29–33] that allows control over their crystalline structure (ranging from amorphous to polycrystalline, including various stoichiometric and non-stoichiometric phases) and electrical conductivity σ spanning from near-insulating values to those characteristic of degenerate disordered semiconductors and disordered metals.

The aim of this work was to establish the correlation between the structural properties, electrical conductivity σ and Seebeck coefficient S in disordered tin oxides films and to test the feasibility of the relationship between thermoelectric and electrical parameters inherent for crystalline materials for the case of tin oxide based semiconductors with a disordered crystalline lattice.

Experimental details

AC magnetron sputtering of tin target (with purity 99.99 %) in argon plasma followed by two-stage oxidative annealing in air of deposited onto the glass substrate tin films was used for synthesis of disordered tin oxide films [34]. The following parameters were used during magnetron deposition process: the tin target diameter was 10 cm, the target-substrate distance was 4 cm, the voltage applied to the target

was 380 V, the pulse repetition rate of AC power supply was 70 kHz. Two-stage oxidative annealing of the deposited tin films was carried out at 200 °C for 2 hours at the 1st stage, followed by an increase in temperature to 350, 400 or 450 °C and isothermal annealing for 1 hour at the 2nd stage. The temperature of the 2nd stage of annealing was varied in order to change the structure, electrical conductivity σ and thermoelectric coefficient S of the films.

The structural properties of disordered tin oxide films were characterized by X-ray diffraction analysis using an Ultima IV RIGAKU X-ray diffractometer in a sliding beam geometry ($\alpha = 3^\circ$) using monochromatic CuK α copper radiation ($\lambda = 0.154178$ nm) and a high-speed D/teX X-ray detector.

The Raman spectra of tin oxide films were measured using a spectral-analytical system Nanofinder HE with excitation by a laser with a wavelength $\lambda = 532$ nm. Measurements were carried out at room temperature in the backscattering configuration. The resolution of spectrometer was 3 cm⁻¹, the diameter of the beam spot was about 1 μ m, and the input power was about 0.6 mW.

Indium contacts were soldered to the samples using an ultrasonic soldering for possibility to study the electrical and thermoelectric properties of the

films. The temperature dependences of the electrical conductivity $\sigma(T)$ were measured in the nitrogen vessel in the temperature range of ≈ 80 –300 K using the four-probe measurements technique. The Seebeck coefficient S measurements were carried out at temperatures in the range 298–300 K in a thermoelectric power cell with a temperature gradient varied from 0.2 to 7 K between the cold and hot ends of the film.

Experimental results and discussion

The influence of the 2nd stage annealing temperature on the crystalline structure and phase composition of synthesized tin oxide films was studied using X-ray diffraction analysis and Raman spectroscopy [34]. The XRD patterns of the tin oxide films samples fabricated at various 2nd stage annealing temperatures (350, 400 and 450 °C) are shown in Figure 1.

The diffraction patterns of the studied samples demonstrate that the applied synthesis method allows the formation of amorphous or polycrystalline multiphase films of tin oxides (including tin monoxide SnO of tetragonal structure, tin dioxide SnO₂ of tetragonal structure of the rutile type, as well as non-stoichiometric phases Sn₂O₃ and Sn₃O₄) [30, 33–36].

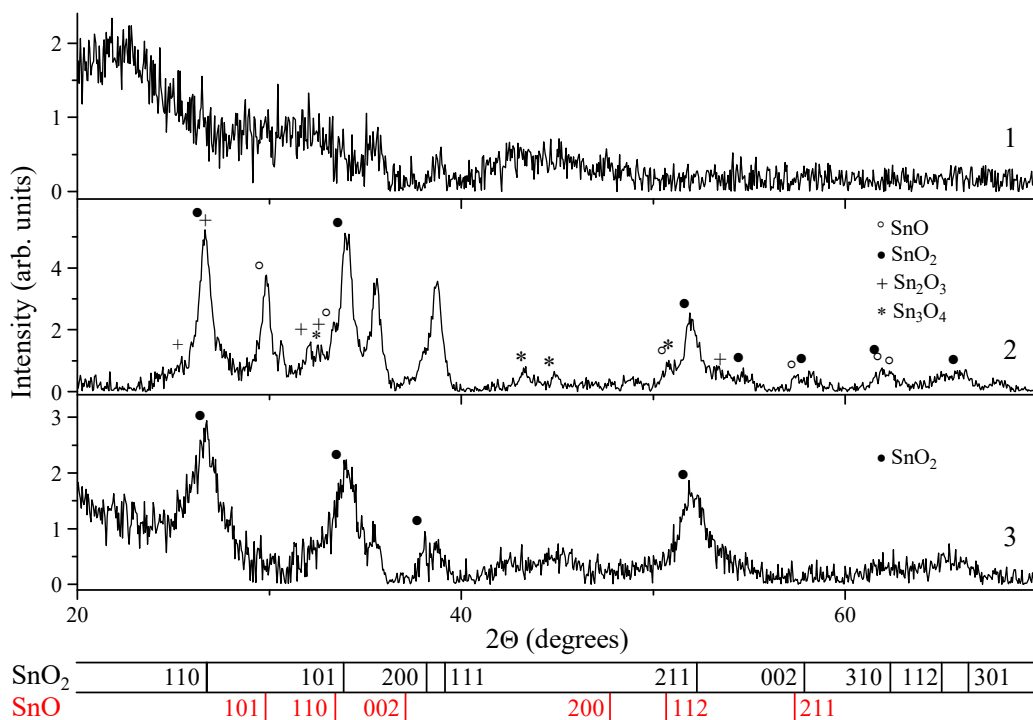


Figure 1 – XRD patterns of the tin oxide films deposited by magnetron sputtering of tin onto glass substrates in an argon atmosphere, followed by two-stage annealing in air: at 200 °C for 2 hours (1st stage) and at 350 °C (1), 400 °C (2) or 450 °C (3) for 1 hour (2nd stage)

In particular, as one can see from Figure 1, films fabricated at 350 °C are characterized by amorphous structure. Tin oxide films synthesized at the temperature 400 °C on the 2nd stage of the annealing procedure exhibited a polycrystalline structure containing both stoichiometric (SnO, SnO₂) and nonstoichiometric (Sn₂O₃, Sn₃O₄) phases. X-ray diffraction patterns of these films showed predominant reflections corresponding to the SnO₂ phase. The most intense peaks near 26.6°, 33.9° and 51.8° can be assigned to the X-ray reflections from the (110), (101) and (211) planes of the SnO₂ tetragonal rutile structure, respectively. The peaks observed around 29.9°, 33.3°, 50.7° and 57.4° correspond to the reflections from the (101), (110), (112) and (211) planes of the tetragonal structure of tin monoxide SnO, suggesting incomplete oxidation of tin films annealed at 400 °C. Increasing of the annealing temperature to 450 °C leads to the formation of tin oxide films with prevailing of SnO₂ tetragonal rutile structure. However, broadening of the peaks near 26.6°, 33.9° and 51.8° related to the X-ray reflections from (110), (101) and (211) planes of this structure indicates the formation of more disordered crystalline structure.

The sizes of SnO₂ crystallites for films annealed at 400 and 450 °C were estimated from the full-width at half-maximum (FWHM) intensity of the observed peaks using the Debye–Scherrer equation in the form [35]:

$$D = K\lambda/\beta\cos\theta, \quad (3)$$

where K is the shape factor which is usually equal to 0.89; λ is the radiation wavelength of CuK α equal to 0.154178 nm; θ is the Bragg diffraction angle; β is the full-width at half maximum (FWHM) of diffraction peak. It was found that crystallites sizes for films annealed at 400 °C are ranging from 10.4 to 13.6 nm, approximately twice the size of crystallites in films annealed at 450 °C (5.6–6.9 nm).

Thus, XRD analysis demonstrated that increasing of the temperature on the 2nd stage of the annealing procedure leads to the essential change of the crystalline structure of the synthesized samples. By means of variation of this technological parameter we can fabricate both amorphous and polycrystalline tin oxide films. Moreover, content of SnO, SnO₂, Sn₂O₃ and Sn₃O₄ phase and crystallites size can be tuned as well by adjusting the 2nd stage annealing temperature.

Strong influence of the annealing temperature on the structural properties of the synthesized tin oxide films is confirmed by the Raman spectra of the samples shown in Figure 2. Raman spectra

of films prepared during the 2nd annealing stage at 350 °C showed no characteristic peaks associated with the vibrational modes of either stoichiometric (SnO, SnO₂) or non-stoichiometric (Sn₂O₃, Sn₃O₄) crystalline tin oxide phases. Only two broad bands are observed in the Raman spectra of these samples. It is possible to distinguish only some low-intensive lines, for example, near 76, 172 and 470 cm⁻¹ (related to the pairs of A_g and B_g vibrational modes of Sn₃O₄), near 204 cm⁻¹ (related to the A_{1g} vibrational mode of SnO), near 299 cm⁻¹ (related to the vibrational modes of Sn₂O₃) [16, 34, 36, 37]. For films obtained at temperatures of 400 and 450 °C at the 2nd stage of annealing, the Raman spectra exhibit characteristic lines of stoichiometric phases SnO (near 204 and 350 cm⁻¹) and SnO₂ (near 630 cm⁻¹), as well as the non-stoichiometric phases Sn₂O₃ (near 76, 299 and 470 cm⁻¹) and Sn₃O₄ (near 172 and 700 cm⁻¹) [37]. These features of Raman spectra correlate with the XRD patterns typical for amorphous and polycrystalline structures, confirming significant structural disorder of these samples.

It was found that the temperature of the 2nd stage annealing procedure of the samples affected not only their structural but also the electrical properties. The measurements of electrical conductivity σ demonstrated that the highest value $\sigma \approx 28.5$ S/m is inherent to the amorphous tin oxide films. This fact can be explained by high mobility of charge carriers μ due to the overlap of spherically symmetric 5s orbitals of Sn atoms [15] and by high concentration of oxygen vacancies [18], which form donor energy levels in the forbidden band of SnO₂ phase, the most electrically conductive phase of the samples. The lowest value of σ , equal to 2.1 S/m, observed for films synthesized at 450 °C is associated with the low concentration of oxygen vacancies due to more effective oxidation processes at high temperatures. Structural analysis further confirms that these polycrystalline films are characterized by small crystallite sizes, which enhances electron scattering at grain boundaries.

It should be noted that all types of the samples are characterized by n -type of electrical conductivity as indicated by the negative sign of the Seebeck coefficient measurements. Polycrystalline films annealed at 400 and 450 °C during the 2nd annealing stage exhibit higher Seebeck coefficients ($S = -156$ μ V/K and -160 μ V/K, respectively) compared to the most conductive sample annealed at 350 °C ($S = -90$ μ V/K).

Temperature dependences of the electrical conductivity of all 3 types of the films are shown in Figure 3 in the scale $\sigma(1/T)$. As one can see in Figure 3,

in spite of the differences in the values of specific electrical conductivity σ of the samples synthesized at different temperatures at the 2nd stage of the annealing procedure, the temperature dependences of the electrical conductivity of all films can be approximated using the same standard equation that takes into account the presence of two donor levels in the band gap of films [38, 39]:

$$\sigma(T) = A \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon_1}{k_B T}\right) + B \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon_2}{k_B T}\right), \quad (4)$$

where A and B are temperature independent parameters; k_B is Boltzmann constant, ε_1 and ε_2 are the energy of activation of electrons from the donor levels.

Table below lists the key electrical and thermo-electrical parameters of the tin oxide films: specific electrical conductivity (σ), Seebeck coefficient (S), activation energies (ε_1 and ε_2), and power factor (PF). Activation energies ε_1 and ε_2 in our samples can be related to the donor impurity levels formed by oxygen vacancies in two different charge states in SnO_2 [40]. Based on the analysis of the $\sigma(T)$ dependences of tin oxide films, we can conclude that the primary mechanism of electrical conductivity in both amorphous and polycrystalline samples within the temperature range of approximately 80–300 K is the thermal activation of electrons from impurity levels. These levels can be associated with oxygen vacancies in two different charge states within the SnO_2 structure.

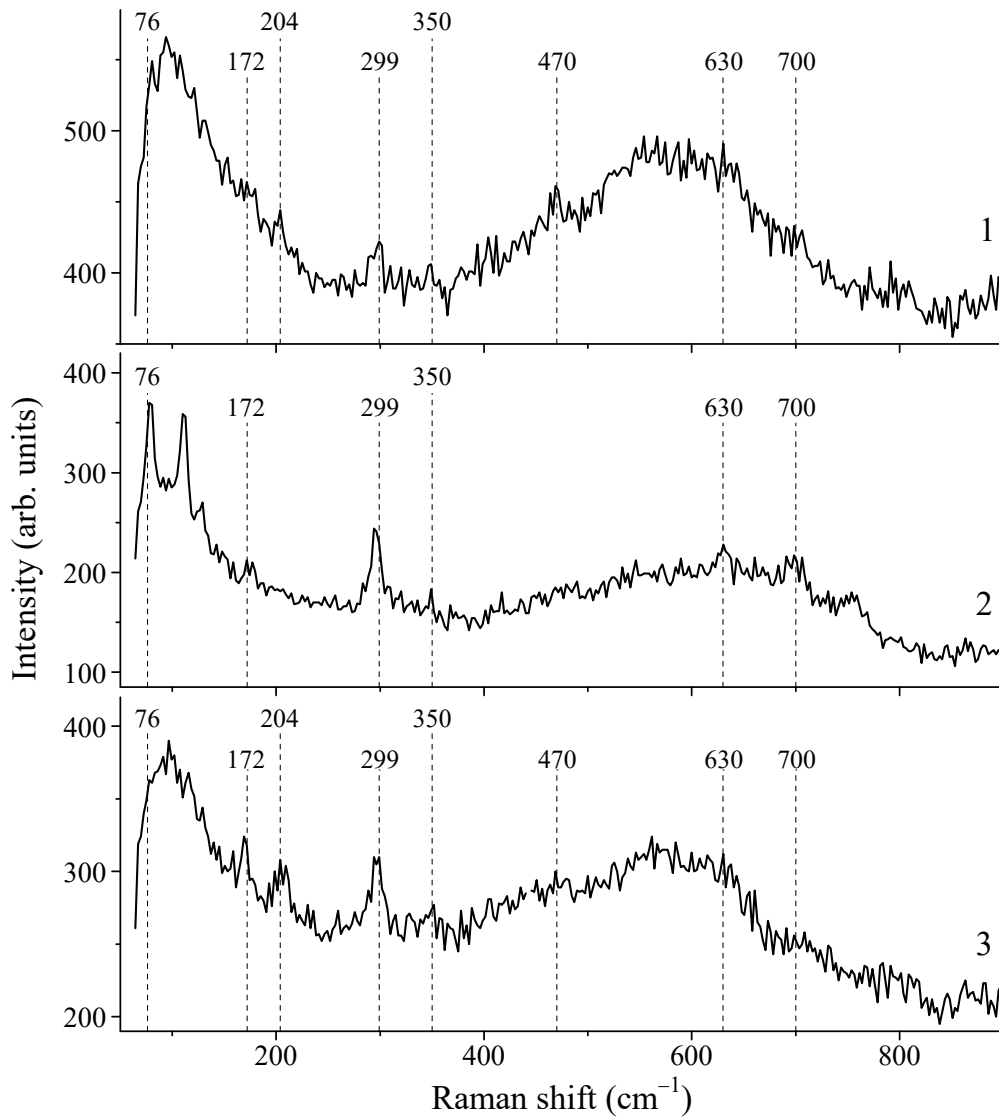


Figure 2 – Raman spectra of the tin oxide films deposited by magnetron sputtering of tin onto glass substrates in an argon atmosphere, followed by two-stage annealing in air: at 200 °C for 2 hours (1st stage) and at 350 °C (1), 400 °C (2) or 450 °C (3) for 1 hour (2nd stage)

Table

Values of specific electrical conductivity σ , Seebeck coefficient S , activation energies ε_1 and ε_2 and power factor PF of the tin oxide films deposited on glass substrates by magnetron sputtering of tin in argon atmosphere with the following annealing in air at 200 °C for 2 hours at the 1st stage and at $T_{a2} = 350, 400$ and 450 °C for 1 hour at the 2nd stage

$T_{a2}, ^\circ\text{C}$	Crystalline structure	$\sigma, \text{S/m}$	$S, \mu\text{V/K}$	$\varepsilon_1, \text{meV}$	$\varepsilon_2, \text{meV}$	PF, $\text{mW/m}\cdot\text{K}^2$
350	Amorphous	28.5	−90	4.7	34.6	$2.31 \cdot 10^{-4}$
400	Polycrystalline	11.5	−156	30.3	84.6	$2.80 \cdot 10^{-4}$
450	Polycrystalline	2.1	−163	39.9	97.2	$5.6 \cdot 10^{-5}$

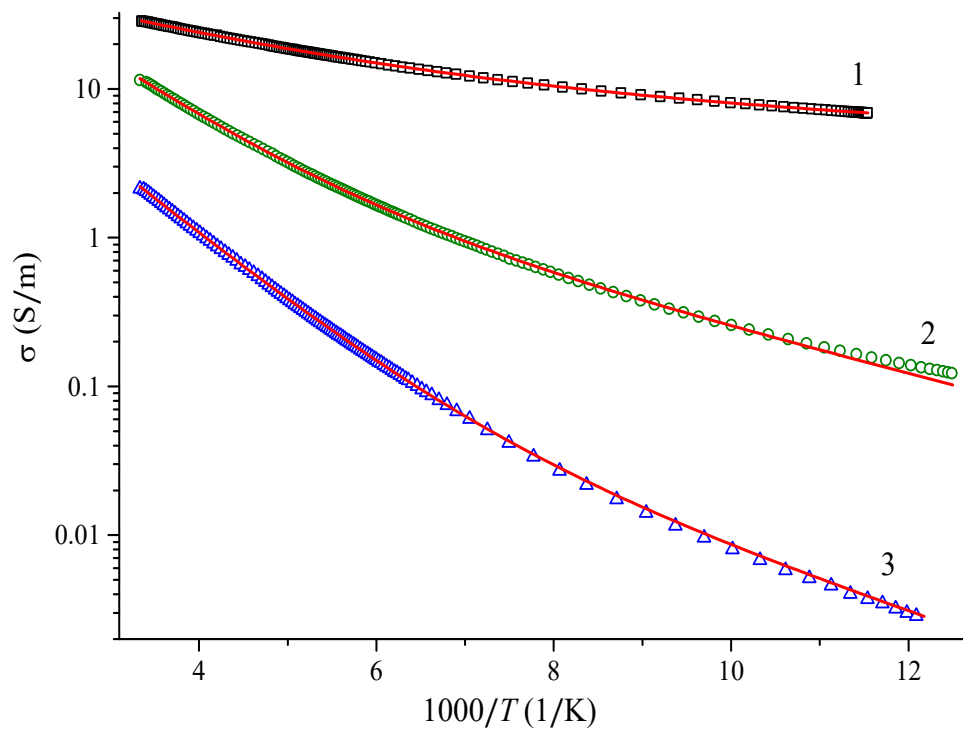


Figure 3 – Temperature dependences of the electrical conductivity in the scale $\sigma(1/T)$ of the tin oxide films deposited by magnetron sputtering of tin onto glass substrates in an argon atmosphere, followed by two-stage annealing in air: at 200 °C for 2 hours at the 1st stage and at 350 (1), 400 (2) or 450 °C (3) for 1 hour at the 2nd stage. Solid lines are the results of the approximation of the experimental data by Eq. (4)

It is known that for crystalline semiconductors with activation type of $\sigma(T)$ dependence the relationship between the Seebeck coefficient S and the position of the Fermi level E_F in the forbidden band is described by the Pisarenko's formula [28, 41, 42]:

$$S = -\frac{k_B}{e}(r + 5/2 - \eta), \quad (5)$$

where k_B is the Boltzmann constant; e is the elementary charge; $\eta = E_F/k_B T$ is the reduced Fermi energy.

For crystalline semiconductors with a dominant mechanism of electron scattering on acoustic phonons, the parameter $r = -1/2$.

The Fermi level position calculated using Eq. (5) with $r = -1/2$ was found to be inconsistent with the measured temperature dependence of electrical conductivity $\sigma(T)$ for our multiphase films. For example, for a film annealed at 350 °C, the Fermi level should be located above the bottom of the conduction band according to Eq. (5). The best correlation between the results of measurements of the $\sigma(T)$

dependences and the Seebeck coefficient was achieved with parameter values $r < -2$.

The calculated values of the Fermi level position in the band gap of our samples were found to be equal to -13.6 , -32.7 and -34.8 meV in the case of parameter $r = -2$ and Seebeck coefficient S (measured at temperature $T \approx 300$ K) equal to -90 , -156 and -163 $\mu\text{V/K}$ for the tin oxides films annealed at 350 , 400 and 450 $^{\circ}\text{C}$, respectively. These Fermi level positions determined within the band gap of our samples show good agreement with the results obtained from electrical conductivity measurements. We assume that parameter r in Eq. (5), for amorphous and polycrystalline tin oxide multiphase samples with prevailing of SnO_2 phase, may differ from that of crystalline tin dioxide films due to additional charge and heat scattering mechanisms beyond acoustic phonons scattering.

Conclusion

The possibility of synthesis of disordered tin oxide films with amorphous and polycrystalline structure characterized by various values of electrical conductivity σ and Seebeck coefficient S by changing the annealing temperature during fabrication procedure was demonstrated.

Activation of electrons from impurity levels associated to the oxygen vacancies in different charge states in the band gap of tin oxide films was proposed as main charge transport mechanism both in amorphous and in polycrystalline samples. The activation energy of electrons from these impurity levels was estimated. It was demonstrated that for all types of the samples, the Pisarenko's formula can be applied to evaluate the relationship between the Seebeck coefficient S and the position of the Fermi level E_F if the parameter $r < -2$.

These results can contribute to the development of thermoelectricity theory in disordered and heterogeneous materials, as well as to the design of thermoelectric energy converters utilizing disordered semiconductors.

Acknowledgments

This work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant No. F22-UZB-056), Belarusian National Research Program "Material science, new materials and technologies" (subprogram "Nanomaterials and

nanotechnologies", task No. 2.14.3), Belarusian National Research Program "Convergence-2025" (subprogram "Interdisciplinary research and new emerging technologies", task No. 3.02.1.4). The authors are grateful to Dr. S.V. Zlotski and Dr. V.I. Shimanskij for implementation of X-ray diffraction measurements as well as to Dr. O.V. Korolik for implementation of Raman spectra measurements.

References

1. Bell LE. Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems. *Science*. 2008;321:1457-1461. DOI: 10.1126/science.1158899
2. Di Salvo FJ. Thermoelectric cooling and power generation. *Science*. 1999;285:703-706. DOI: 10.1126/science.285.5428.703
3. Dmitriev AV, Zvyagin IP. Current trends in the physics of thermoelectric materials. *Phys. Usp.* 2010;53(8):789-803. DOI: 10.3367/UFNe.0180.201008b.0821
4. Zevalkink A. [et al.]. A practical field guide to thermoelectrics: Fundamentals, synthesis, and characterization. *Applied Physics Reviews*. 2018;5(2):021303. DOI: 10.1063/1.5021094
5. Yamamoto K. [et al.]. Thermoelectricity near Anderson localization transitions. *Physical Review B*. 2017;96(15):155201. DOI: 10.1103/PHYSREVB.96.155201
6. Dresselhaus MS. [et al.]. New Directions for Low-Dimensional Thermoelectric Materials. *Advanced Materials*. 2007;19(8):1043-1053. DOI: 10.1002/adma.200600527
7. Wang J. [et al.]. Low-Dimensional Nanomaterials for Thermoelectric Detection of Infrared and Terahertz Photons. In: Park CR (ed.) *Advanced Thermoelectric Materials*. Scrivener Publishing LLC; 2019:267-316.
8. Pennelli G, Dimaggio E, Masci A. Silicon Nanowires: A Breakthrough for Thermoelectric Applications. *Materials*. 2021;14(18):5305. DOI: 10.3390/ma14185305
9. Zheng Y. [et al.]. Defect engineering in thermoelectric materials: what have we learned? *Chemical Society Reviews*. 2021;50(16):9022-9054. DOI: 10.1039/D1CS00347J
10. Bux SK. [et al.]. Nanostructured Bulk Silicon as an Effective Thermoelectric Material. *Adv. Funct. Mater.* 2009;19(15):2445-2452. DOI: 10.1002/adfm.200900250
11. Ohita H. Thermoelectrics based on strontium titanate. *Mater. Today* 2007;10:44-49. DOI: 10.1016/S1369-7021(07)70244-4
12. Tritt TM, Subramanian MA. Thermoelectric Materials, Phenomena, and Applications: A Bird's Eye View. *MRS Bull.* 2006;31:188-198. DOI: 10.1557/mrs2006.44

13. Dmitriev AV. High doping effect on the thermoelectric properties of p-type lead telluride. *Journal of Applied Physics*. 2018;123:165707. **DOI:** 10.1063/1.5025766
14. Feng Y. [et al.]. Metal oxides for thermoelectric power generation and beyond. *Adv. Compos. Hybrid Mater.* 2018;1(1):114-126. **DOI:** 10.1007/s42114-017-0011-4
15. Kim S. [et al.]. Transparent Amorphous Oxide Semiconductor as Excellent Thermoelectric Materials. *Coatings*. 2018;8(12):462. **DOI:** 10.3390/coatings8120462
16. Batzill M, Diebold U. The surface and materials science of tin oxide. *Progress in Surface Science*. 2005;79(2-4):47-154. **DOI:** 10.1016/j.progsurf.2005.09.002
17. Kiliç C, Zunger A. Origins of coexistence of conductivity and transparency in SnO₂. *Phys. Rev. Lett.* 2002;88(9):095501. **DOI:** 10.1103/PhysRevLett.88.095501
18. Ksenevich V. [et al.]. Weak Localization in Polycrystalline Tin Dioxide Films. *Materials*. 2020;13(23):5415. **DOI:** 10.3390/ma13235415
19. Miller S. [et al.]. SnO as a Potential Oxide Thermoelectric Candidate. *J. Mater. Chem. C*. 2017;5(34):8854-8861. **DOI:** 10.1039/C7TC01623A
20. Vieira EMF. [et al.]. Highly sensitive thermoelectric touch sensor based on p-type SnO_x thin film. *Nanotechnology*. 2019;30(43):5502. **DOI:** 10.1088/1361-6528/ab33dd
21. Kuwahara S. Synthesis of High-Density Bulk Tin Monoxide and Its Thermoelectric Properties. *Materials Transactions*. 2018;59(7):1022-1029. **DOI:** 10.2320/matertrans.E-M2018804
22. Kumar DA. [et al.]. Nanostructured Oxide (SnO₂, FTO) Thin Films for Energy Harvesting: A Significant Increase in Thermoelectric Power at Low Temperature. *Micromachines*. 2024;15(2):188. **DOI:** 10.3390/mi15020188
23. Bagheri-Mohagheghi M-M, Shokooh-Saremi M. The electrical, optical, structural and thermoelectrical characterization of n- and p-type cobalt-doped SnO₂ transparent semiconducting films prepared by spray pyrolysis technique. *Phys. B Condens. Matter*. 2010;405(19):4205-4210. **DOI:** 10.1016/j.physb.2010.06.067
24. Moharrami F, Bagheri-Mohagheghi M-M, Azimi-Juybari H. Study of structural, electrical, optical, thermoelectric and photoconductive properties of S and Al co-doped SnO₂ semiconductor thin films prepared by spray pyrolysis. *Thin Solid Film*. 2012;520(21):6503-6509. **DOI:** 10.1016/j.tsf.2012.06.075
25. Ferreira M. [et al.]. SnO₂ thin film oxides produced by rf sputtering for transparent thermoelectric devices. *Mater. Today Proc.* 2015;2(2):647-653. **DOI:** 10.1016/j.matpr.2015.05.090
26. Macario LR, Golabek A, Kleinke H, Leite ER. Thermoelectric properties of Sb-doped tin oxide by a one-step solid-state reaction. *Ceramics International*. 2022;48(3): 3585-3591. **DOI:** 10.1016/j.ceramint.2021.10.137
27. Walsh A, Watson GW. Influence of the anion on lone pair formation in Sn(II) monochalcogenides: A DFT study. *Journal of Physical Chemistry B*. 2005;109(40):18868-18875. **DOI:** 10.1021/jp051822r
28. Seeger K. *Physics of Semiconductors M.*, Mir. 1977;615 p.
29. Adamchuk DV, Ksenevich VK, Gorbachuk NI, Shimanskij VI. Impedance spectroscopy of polycrystalline tin dioxide films. *Devices and Methods of Measurements*. 2016;7(3):312-321. (In Russ.) **DOI:** 10.21122/2220-9506-2016-7-3-84-89
30. Adamchuk DV, Ksenevich VK. Control of Electrical and Optical Parameters of Humidity Sensors Active Elements Based on Tin Oxides Films with Variable Composition. *Devices and Methods of Measurements*. 2019;10(2):138-150. (In Russ.) **DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-2-138-150
31. Adamchuk DV. [et al.]. Nonstoichiometric tin oxide films: study by X-ray diffraction, Raman scattering and electron paramagnetic resonance. *Lithuanian Journal of Physics*. 2019;59(4):179-187. **DOI:** 10.3952/physics.v59i4.4138
32. Adamchuk DV, Ksenevich VK, Poklonski NA, Kavaleu AI. Features of water vapor adsorption and desorption on the surface of non-stoichiometric tin dioxide films. *Vestsi Natsyional'nai akademii navuk Belarusi. Seryia fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*. 2020;56(1):102-113. (in Russ.) **DOI:** 10.29235/1561-2430-2020-56-1-102-113
33. Ksenevich VK. [et al.]. Effect of the oxidative annealing temperature on the structural and optical characteristics of tin oxide films. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2025;91(6):1233-1239. **DOI:** 10.1007/s10812-025-01842-z
34. Ksenevich V. [et al.]. Synthesis of amorphous and polycrystalline tin oxide films for applications as thermoelectric materials. *Interaction of Radiation with Solids : Proceedings of the 15th International Conference, Minsk, Belarus, September 26-29, 2023 / Belarusian State Univ.; ed.: V.V. Uglov (ed.-in-chief) [et al.]. Minsk, BSU. 2023;521-523 (In Russ.). <https://elib.bsu.by/handle/123456789/304265>*
35. Boroojerdian P. Structural and Optical Study of SnO Nanoparticles Synthesized Using Microwave-Assisted Hydrothermal Route // *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2013;9(2):95-100. https://www.ijnnonline.net/article_3824.html

36. Sangaletti L. [et al.] Oxidation of Sn thin films to SnO₂. Micro-Raman mapping and X-ray diffraction studies // Journal of Materials Research. 1998;13(9):2457-2460. **DOI:** 10.1557/JMR.1998.0343.
37. Eifert B. [et al.]. Raman studies of the intermediate tin-oxide phase. Physical Review Materials 2017;1:014602.
DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.1.014602
38. Jiang J. [et al.]. Transport mechanisms in SnO₂: N, H thin film grown by chemical vapor deposition. Phys. Status Solidi B: Basic Research. 2017;254(7):1700003.
DOI: 10.1002/pssb.201700003
39. Ji YC, Zhang HX, Zhang XH, Li ZQ. Structures, optical properties, and electrical transport processes of SnO₂ films with oxygen deficiencies. Phys. Stat. Sol. (B). 2013;250(10):2145-2152.
DOI: 10.1002/pssb.201349086
40. Samson S, Fonstad CG. Defect structure and electronic donor levels in stannic oxide crystals. J. Appl. Phys. 1973;44(10):4618-4621.
DOI: 10.1063/1.1662011
41. Serhiienko I. [et al.]. Record-High Thermoelectric Performance in Al-Doped ZnO via Anderson Localization of Band Edge States. Adv. Sci. 2024;11:2309291.
DOI: 10.1002/advs.202309291
42. Novitskii A. [et al.]. Defect Engineering of Bi₂SeO₂ Thermoelectrics. Adv. Funct. Mater. 2025;35:2416509. **DOI:** 10.1002/adfm.202416509

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-98-108

Эволюционный алгоритм искусственного интеллекта для оптимизации обнаружения фаз шага по данным трёхосевого акселерометра, размещённого на стопе

П.А. Хмарский

Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь

Поступила 15.04.2025

Принята к печати 03.06.2025

Современные технологии захвата движения и анализа его параметров, основанные на использовании инерциальных измерительных модулей, находят всё более широкое применение в различных областях: биомедицинская инженерия, спорт, мониторинг физической активности, эргономика, научные исследования движения и смежные дисциплины. Цель исследования заключалась в разработке и экспериментальной проверке алгоритма автоматического подбора частотных характеристик фильтров и порога обнаружения для повышения точности и надёжности обнаружения фаз шага. Данная задача имеет принципиальное значение не только для объективной реабилитации и мониторинга двигательной активности, но и для задач спортивной аналитики, эргономики, игровых и инженерных разработок, а также научных исследований локомоции. В работе представлен автоматизированный подход к оптимизации параметров обнаружителя фаз шага на основе данных трёхосевого акселерометра, закреплённого на стопе. Реализован эволюционный алгоритм искусственного интеллекта, имитирующий процессы естественного отбора, который обеспечивает автоматический поиск оптимальных параметров обнаружителя шага путём минимизации ошибки между восстановленной с помощью инерциальных измерительных модулей и эталонной (оптической) траекторией, полученной с системой OptiTrack. Подробно описаны механизмы формирования и эволюции популяции параметров, построение целевой функции и методы компенсации дрейфа при интегрировании ускорения. Эксперименты с движением по замкнутому квадратному маршруту подтвердили высокую точность и устойчивость предлагаемого метода: совпадение оптимизированной траектории с эталонной указывает на практическую применимость подхода для точной реконструкции локомоции в различных условиях. Методика легко адаптируется к индивидуальным особенностям движений и может быть интегрирована в современные носимые сенсорные системы для широкого спектра научных и прикладных задач.

Ключевые слова: обнаружение шага, инерциальный измерительный модуль, акселерометр, эволюционные алгоритмы, захват движения

Адрес для переписки:

Хмарский П.А.
Ин-т прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: pierre2009@mail.ru

Address for correspondence:

Khmarskiy P.A.
Institute of Applied Physics of the National Academy of Science
of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus
e-mail: pierre2009@mail.ru

Для цитирования:

П.А. Хмарский.
Эволюционный алгоритм искусственного интеллекта
для оптимизации обнаружения фаз шага по данным трёхосевого
акселерометра, размещённого на стопе.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 2. С. 98–108.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-98-108

For citation:

Khmarskiy P.A.
Evolutionary Artificial Intelligence Algorithm for Optimizing Step
Phase Detection Based on Foot-Mounted Triaxial Accelerometer Data.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(2):98–108. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-98-108

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-98-108

Evolutionary Artificial Intelligence Algorithm for Optimizing Step Phase Detection Based on Foot-Mounted Triaxial Accelerometer Data

P.A. Khmarskiy

*Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus*

Received 15.04.2025

Accepted for publication 03.06.2025

Abstract

The aim of this study was to develop and experimentally validate an algorithm for automatic selection of filter frequency characteristics and detection threshold in order to enhance the accuracy and reliability of gait phase detection. This challenge is crucial not only for objective rehabilitation and monitoring of motor activity, but also for sports analytics, ergonomics, gaming and engineering applications, as well as studies of human locomotion. An automated approach for optimizing the parameters of a gait phase detector based on data from a three-axis foot-mounted accelerometer is presented. This work implements an evolutionary artificial intelligence algorithm that mimics natural selection processes, providing automatic search for the optimal gait phase detector parameters by minimizing the error between the trajectory obtained from inertial measurement units and the reference (optical) trajectory acquired using an OptiTrack system. Details are provided regarding the formation and evolution of the parameter population, design of the objective function, and drift compensation methods utilized during acceleration integration. Experiments involving walking along a closed square path confirmed the high accuracy and robustness of the proposed method: the match between the optimized and reference trajectories demonstrates the practical applicability of the approach for precise gait reconstruction under different conditions. The proposed methodology is easily adaptable to individual movement characteristics and can be integrated into modern wearable sensor systems for a wide range of scientific and applied tasks

Keywords: step detection, inertial measurement unit, accelerometer, evolutionary algorithms, motion capture

Адрес для переписки:

Хмарский П.А.
Ин-т прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: pierre2009@mail.ru

Address for correspondence:

Khmarskiy P.A.
Institute of Applied Physics of the National Academy of Science
of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus
e-mail: pierre2009@mail.ru

Для цитирования:

П.А. Хмарский.
Эволюционный алгоритм искусственного интеллекта
для оптимизации обнаружения фаз шага по данным трёхосевого
акселерометра, размещённого на стопе.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 2. С. 98–108.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-98-108

For citation:

Khmarskiy P.A.
Evolutionary Artificial Intelligence Algorithm for Optimizing Step
Phase Detection Based on Foot-Mounted Triaxial Accelerometer Data.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(2):98–108. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-98-108

Введение

Современные технологии захвата движения и анализа его параметров, основанные на использовании инерциальных измерительных модулей, находят все более широкое применение в различных областях: биомедицинская инженерия, спорт, мониторинг физической активности, эргономика, научные исследования движения и смежные дисциплины [1–4]. Благодаря объединению в одном корпусе трёхосевых акселерометров, гироскопов и часто магнетометров, такие модули обеспечивают автономную, высокочастотную и воспроизводимую регистрацию движений вне лабораторных условий, открывая новые возможности для комплексного анализа двигательной активности человека [2, 4–6].

Одна из ключевых и сложных задач в этой области – автоматическое выделение фаз шага, которое необходимо для точного расчёта пространственно-временных и кинематических характеристик походки: длины шага, темпа, симметрии, анализа траекторий и паттернов двигательной активности в естественных условиях [3, 4, 7, 8]. На практике параметры фильтрации и пороговые значения для обнаружения фаз шага часто устанавливаются вручную, что снижает воспроизводимость алгоритмов, влияет на достоверность получаемых данных и может приводить к дополнительным ошибкам при длительном мониторинге [7, 9].

Современные исследования показывают, что автоматизированная оптимизация параметров обнаружения фаз шага позволяет значительно повысить точность и устойчивость работы алгоритмов как в спортивных и биомедицинских приложениях, так и при оценке эргономики рабочих процессов и изучении закономерностей человеческого движения [4, 6, 8, 10]. Эффективный способ решения подобных оптимизационных задач представлен эволюционными методами искусственного интеллекта, в частности генетическими алгоритмами, которые, наряду с традиционными подходами машинного обучения, позволяют находить оптимальные решения в сложных, многомерных и слабо формализуемых пространствах параметров [4, 7].

Данная работа посвящена применению эволюционного алгоритма искусственного интеллекта для автоматизированной оптимизации параметров фильтрации и обнаружения фаз

шага по данным с трёхосевого акселерометра, закреплённого на стопе. В исследовании рассмотрены особенности используемых сигнальных признаков, методы компенсации дрейфа ускорения акселерометра, а также реализованы подходы к автоматизированному подбору параметров с целью повышения точности и воспроизводимости обнаружения фаз шага. Для объективной валидации результатов проведено сравнение с эталонными траекториями, полученными с помощью высокоточной оптической системы захвата движения OptiTrack. Полученные решения актуальны для широкого спектра задач анализа человеческого движения – от спорта и научных исследований до мониторинга активности, эргономики и автоматизированных систем оценки походки.

Цель работы – разработать и экспериментально проверить алгоритм оптимизации параметров обнаружения фаз шага на основе данных трёхосевого акселерометра стопы с применением эволюционного алгоритма искусственного интеллекта на экспериментальных данных с эталонными траекториями.

Фазы шага и особенности их обнаружения по данным акселерометра

Исследование походки человека традиционно основывается на разбиении шага на отдельные фазы – опорную и переносную (также встречаются более детализированные подфазы: начальный контакт, стопа плоско на земле, отрыв пятки, перенос, см. рисунок 1). Чёткое выделение этих фаз позволяет объективно оценивать динамику нагрузки, координацию и возможные нарушения походки [1].

В рамках настоящей работы основной интерес представляло выделение моментов смены фазы опоры на фазу переноса стопы при ходьбе. Для автоматического выделения фаз шага использовался акселерометр, закреплённый непосредственно на стопе испытуемого. Такое размещение обеспечивает наилучшую информативность, поскольку именно в области стопы динамика шага проявляется максимально выражено [2, 11]: на этом участке чётко видны моменты перехода от фазы опоры к фазе переноса, а амплитуда сигналов значительно выше по сравнению с другими частями конечности. Размещение датчика на голени или бедре также возможно, однако сопровождается снижением точности обнаружения фаз шага из-за

сглаживания характерных пиков и повышенного влияния шумов [2].

Обнаружение фаз шага реализовывалось по схеме, представленной на рисунке 2.

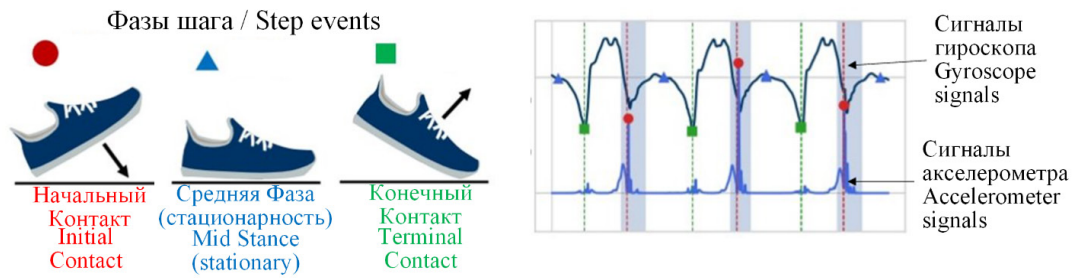


Рисунок 1 – Фазы шага и сигналы датчиков инерциального измерительного модуля

Figure 1 – Phases of gait and signals from inertial measurement unit sensors

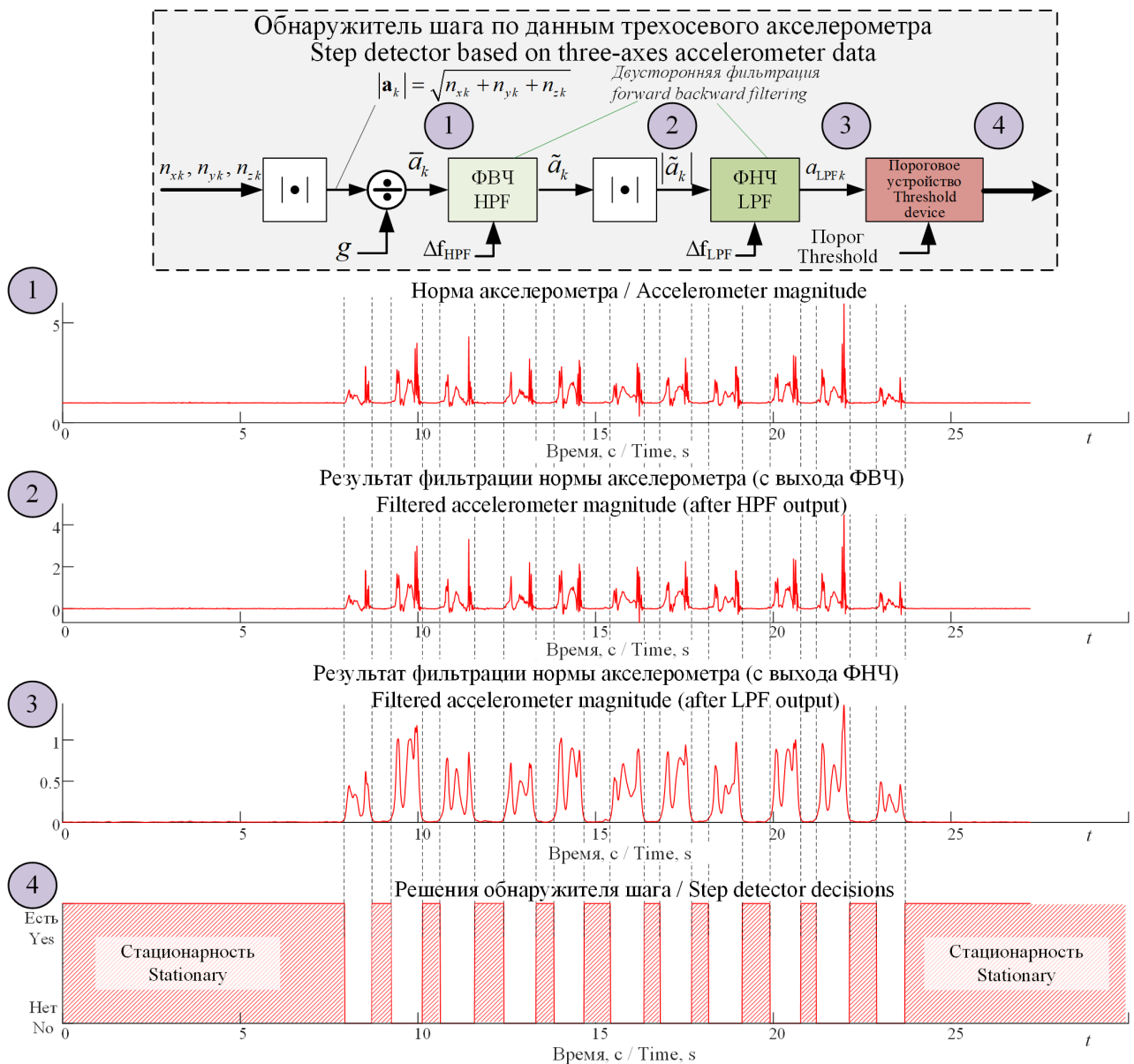


Рисунок 2 – Структурная схема и временные диаграммы обнаружителя шага по данным трёхосевого акселерометра, закреплённого на стопе

Figure 2 – Structural diagram and time diagrams of the step detector based on a three-axis accelerometer mounted on the foot

В качестве исходной величины использовалась норма ускорения, вычисляемая по трём осям акселерометра как $|a_k| = \sqrt{n_{xk} + n_{yk} + n_{zk}}$.

Далее этот сигнал проходил через последовательную фильтрацию с помощью двух линейных фильтров [12]: фильтр верхних частот использовался для удаления медленно изменяющихся трендов и гравитационного дрейфа; фильтр нижних частот подавлял высокочастотные шумы, сохраняя динамические компоненты, обусловленные шагом. В обнаружителе применяется двусторонняя фильтрация – когда сигнал пропускается через фильтр сначала в прямом, а затем в обратном направлении. Такой подход позволяет полностью исключить фазовые искажения и обеспечивает корректную временную локализацию всех событий (отсутствие запаздывания по времени). На завершающем этапе обработки сигнал поступает на пороговое устройство: если значение сигнала превышает заданный порог, фиксируется момент движения стопы; если опускается ниже порогового значения – определяется фаза стационарности (опора).

Выбор значений частотных полос фильтров (верхних и нижних частот) и уровня порога имеет решающее значение: слишком широкая или узкая полоса фильтра может привести к потере

или искажению шага, а неправильно выбранный порог – к ошибочным или пропущенным обнаружениям фаз шага. Обычно эти параметры назначаются вручную, что снижает воспроизводимость и негативно сказывается на точности определения структуры шага, особенно на реальных клинических и реабилитационных данных. Поэтому в данной работе особое внимание уделялось автоматизированной оптимизации параметров фильтрации и порогового уровня, что позволило повысить надёжность работы обнаружителя фаз шага и учесть индивидуальные особенности походки.

После обнаружения фаз шага следующим этапом является восстановление траектории и скоростей стопы. Наиболее простой способ – двойное интегрирование ускорения по осям. Однако при его применении неизбежно возникает выраженная ошибка из-за накопления малейших шумов и смещений (дрейфа), приводящая к некорректному восстановлению скоростей и координат. Это хорошо видно на рисунке 3: верхний график – исходные («сырые») ускорения по осям в мировой системе; средний – выделение статуса стационарности (фаз шага); нижний – скорости, полученные простым интегрированием: отчётливо видна тенденция «дрейфа» всех трёх компонент скорости по мере времени.

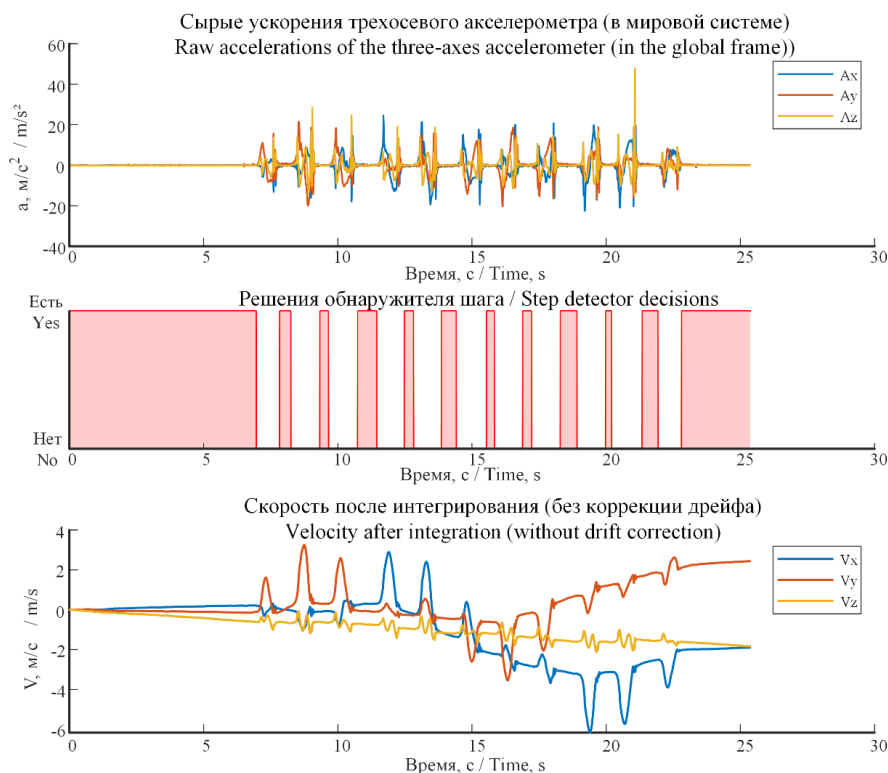


Рисунок 3 – К проблеме дрейфа данных трёхосевого акселерометра

Figure 3 – On the problem of drift in three-axis accelerometer data

Для устранения накопления ошибки (статичности), выявляемом обнаружителем шага (рисунок 4). Такой подход позволяет эффективно компенсировать накопленный дрейф и существенно повысить точность оценки траекторных параметров движения [11].

Для устранения накопления ошибки (статичности), выявляемом обнаружителем шага (рисунок 4). Такой подход позволяет эффективно компенсировать накопленный дрейф и существенно повысить точность оценки траекторных параметров движения [11].

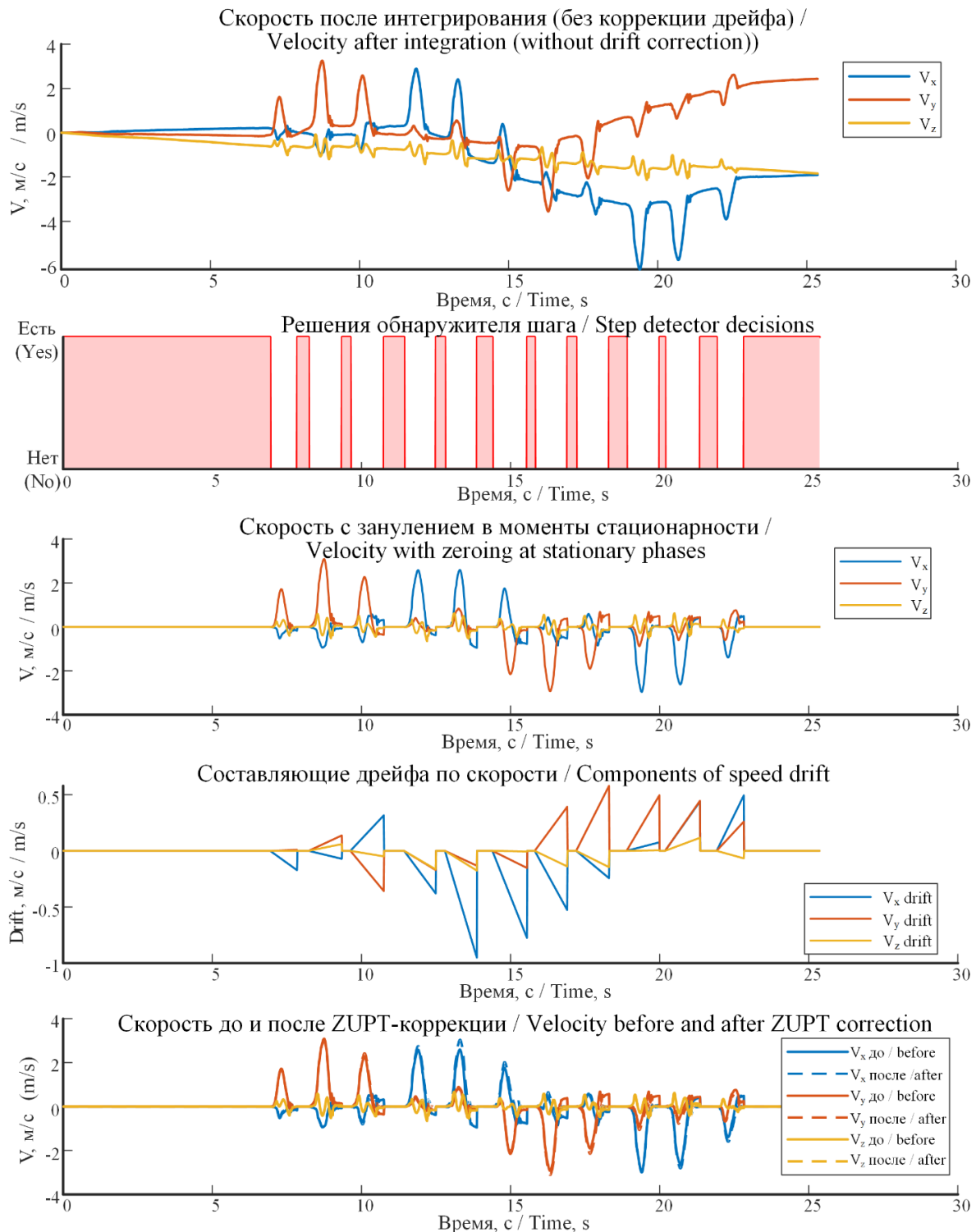


Рисунок 4 – К пояснению алгоритма ZUPT

Figure 4 – Explanation of the ZUPT algorithm

На рисунке 4 представлены результаты применения алгоритма ZUPT для коррекции дрейфа скоростей, возникающего при двойном интегрировании ускорений акселерометра. Хорошо видно, что при отсутствии компенсации скорости постепенно «уплывают» от исходного уровня по всем осям, а также накапливается дрейф – последовательная систематическая ошибка. После применения алгоритма ZUPT, реализующего регулярную коррекцию скоростей в моменты стационарности стопы, величина дрейфа практически полностью устраняется:

восстановленные скорости периодически сбрасываются к нулю при каждом шаге, что обеспечивает гораздо более достоверное определение кинематических параметров движения.

Для повышения точности выделения фаз шага и, как следствие, всей последующей кинематической реконструкции в работе реализован модуль оптимизации параметров обнаружителя шага. На рисунке 5 представлена структурная схема взаимодействия всех ключевых компонентов алгоритма.

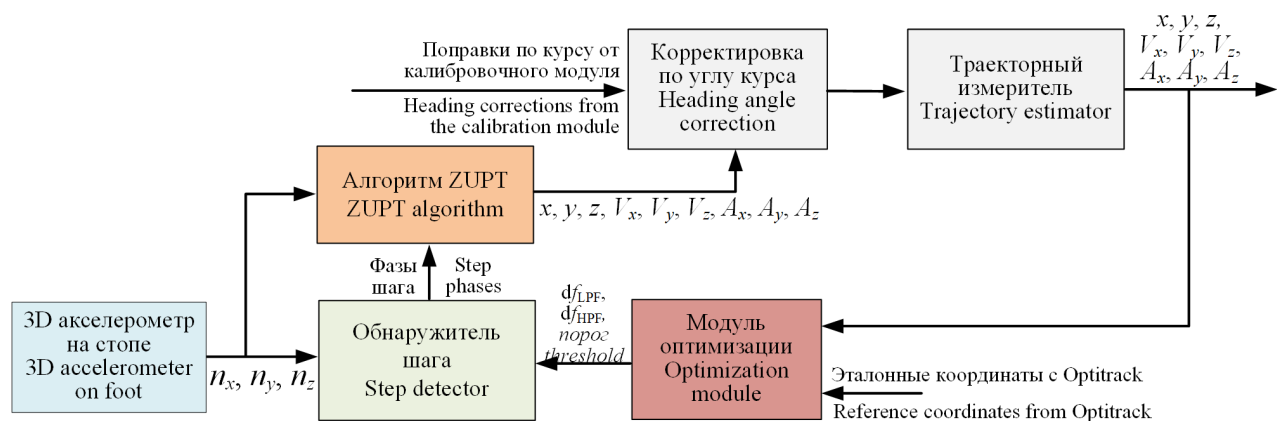


Рисунок 5 – Схема оптимизации обнаружителя шага

Figure 5 – Step detector optimization scheme

Сырые данные трёхосевого акселерометра, закреплённого на стопе, поступают на блок обнаружителя шага, где определяется положение стопы (фазы опоры и переноса), что непосредственно влияет на дальнейшую обработку данных. Полученная информация используется в алгоритме ZUPT для регулярной коррекции скоростей.

Для повышения точности реконструкции траектории по данным инерциального измерительного модуля методом ZUPT в работе реализован автоматизированный подход к подбору параметров фильтрации и порогов обнаружения фаз шага в модуле оптимизации. Центральным элементом метода выступает эволюционный алгоритм искусственного интеллекта из семейства генетических алгоритмов [4, 7], применение которого обусловлено высокой размерностью и выраженной нелинейностью задачи, а также сложными взаимосвязями между параметрами фильтрации, особенностями сигнала и точностью выделения фаз шага. Эволюционный алгоритм

имитирует процессы естественного отбора, поэтапно улучшая решения на основе принципов селекции, скрещивания, мутаций и выживания наиболее приспособленных особей. Формируется популяция случайно сгенерированных наборов параметров (коэффициенты фильтрации, оконные параметры сглаживания, пороги обнаружения). Для каждого набора проводился полный анализ: фильтрация ускорений, обнаружения фаз шага, восстановление траектории методом двойного интегрирования и расчёт целевой функции – среднеквадратичной ошибки между восстановленной и эталонной траекторией по данным системы захвата OptiTrack. По результату ошибки вычислялась «приспособленность» (fitness), и следующее поколение формировалось из лучших решений с последующими генетическими операциями.

Преимущество эволюционного подхода – возможность эффективно исследовать обширное пространство параметров с учётом их взаимозависимостей, в отличие от традиционных методов. Алгоритм не требует специальной

формы целевой функции, легко адаптируется под конкретную задачу и ограничения параметров. Такое решение автоматизирует настройку обнаружителя шага, повышает точность динамического анализа походки и создаёт основу для гибких и индивидуализированных систем анализа движений, адаптирующихся к особенностям оборудования и целей исследования.

Экспериментальное исследование и анализ результатов

Эксперимент выполнялся в специализированных лабораторных условиях. Испытуемые выполняли свободную ходьбу по заранее размеченному маршруту, включающему как прямолинейные, так и поворотные участки, с естественной для себя скоростью в течение заданного интервала времени.

Для регистрации параметров движения использовались инерциальные модули ICM-20948 (InvenSense), оснащённые трёхосевыми акселерометром, гироскопом и магнитометром. Эти модули обеспечивают одновременную регистрацию данных по всем каналам с частотой до 1125 Гц для акселерометра и гироскопа, обладают низким уровнем шумов и энергопотребления, а также компактными габаритами, что допускает их использование вне лабораторных условий. В каждом случае датчики размещались на ключевых сегментах нижних конечностей в соответствии с типовой анатомической схемой для сбора данных о кинематике движения (рисунок 6). На ноги испытуемого дополнительно крепились маркеры системы оптического захвата движения OptiTrack для валидации данных, что иллюстрируется на рисунке 6.

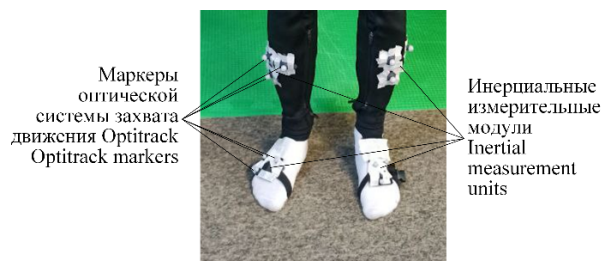


Рисунок 6 – Размещение инерциальных измерительных модулей на ногах с оптическими маркерами Optitrack

Figure 6 – Placement of inertial measurement units on the legs with OptiTrack optical markers

Экспериментальная площадка (рисунок 7) была оснащена системой захвата движения OptiTrack, обеспечивающей высокоточную регистрацию перемещений для верификации алгоритмов. Комплекс включает 12 камер (1,3 МП, 240 кадров/с), размещённых по периметру лаборатории для максимального охвата. Система обеспечивает ошибку измерения положения оптических маркеров не более 1 мм, что позволяет использовать её в качестве «золотого стандарта» при сравнении с инерциальными алгоритмами. На полу отмечены четыре контрольные точки, формирующие базовую траекторию движения испытуемого. Такой подход обеспечивает синхронную регистрацию и подробный сравнительный анализ данных инерциальных и оптических систем.

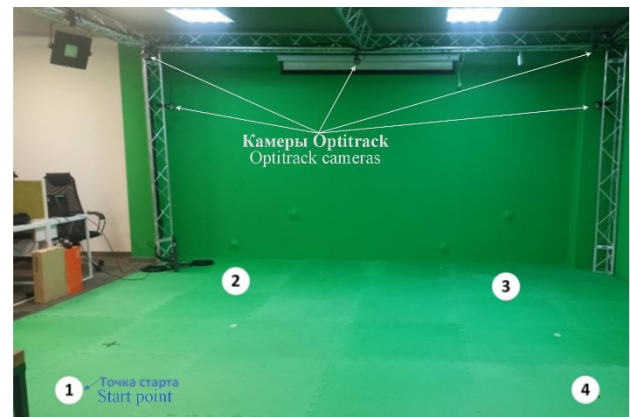


Рисунок 7 – Схема проведения эксперимента

Figure 7 – Experimental setup scheme

Параметры, подбиравшиеся в ходе оптимизации согласно схеме на рисунке 5, включали частоты среза df_{HPF} и df_{LPF} , уровень порога для определения фаз шага. Эволюционный алгоритм начинал с заранее определённой популяции и в процессе 50 поколений эволюционировал к наилучшему решению, минимизируя ошибку между рассчитанными и эталонными координатами. В результате оптимизации были получены следующие параметры: $df_{HPF} = 0,002133$, $df_{LPF} = 2,04$ и уровень порога равный 0,0444, средняя ошибка позиционирования $\Delta\Sigma$ составила 0,1281 м.

На рисунке 8 представлены ключевые результаты проведенной оптимизации. Демонстрируется быстрое снижение ошибки (рисунок 8a) – уже к 17 поколению достигается плато с оптимальными параметрами, подтверждая эффективность и быструю

сходимость метода. Карта на рисунке 8b наглядно показывает области оптимальных частотных характеристик фильтров, при которых

минимизируется ошибка восстановления положения, что подчеркивает ключевую роль фильтрации сигналов.

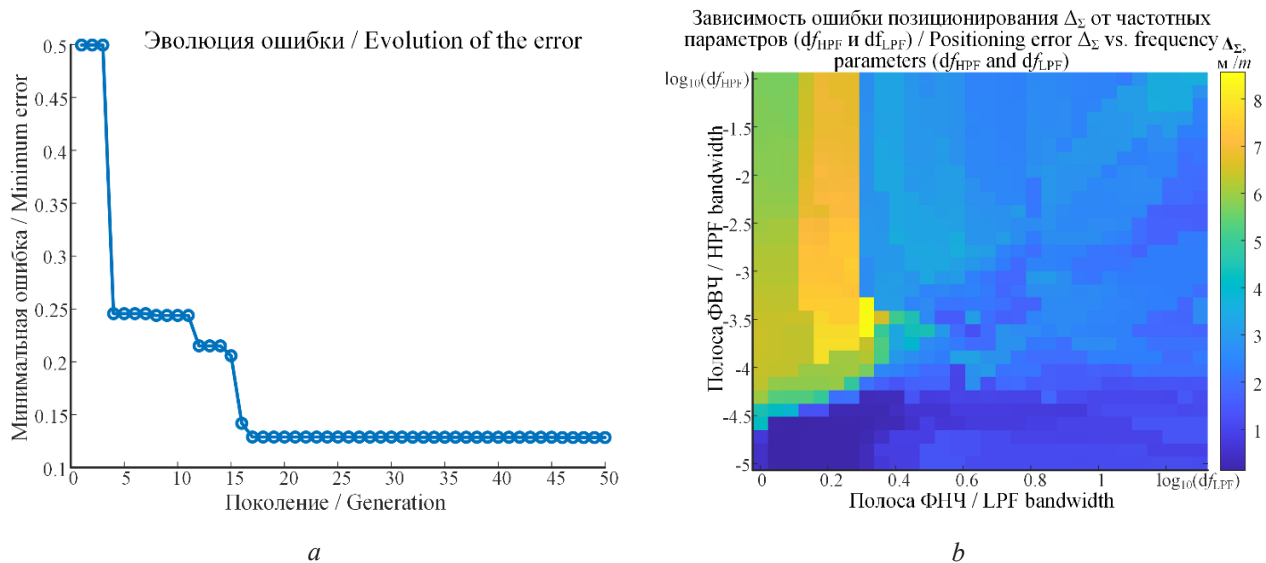


Рисунок 8 – Эффективность оптимизации параметров: *a* – эволюция минимальной ошибки в процессе работы алгоритма оптимизации; *b* – карта влияния частотных параметров фильтрации на ошибку измерения положения

Figure 8 – Optimization efficiency: *a* – evolution of the minimum error during the optimization algorithm; *b* – map of the effect of filter frequency parameters on position error measurement

В завершение, эффективность автоматизированного подбора подтверждается сравнением полученной в результате опти-

мизации траектории и эталонных координат, зарегистрированных системой OptiTrack (см. рисунок 9).

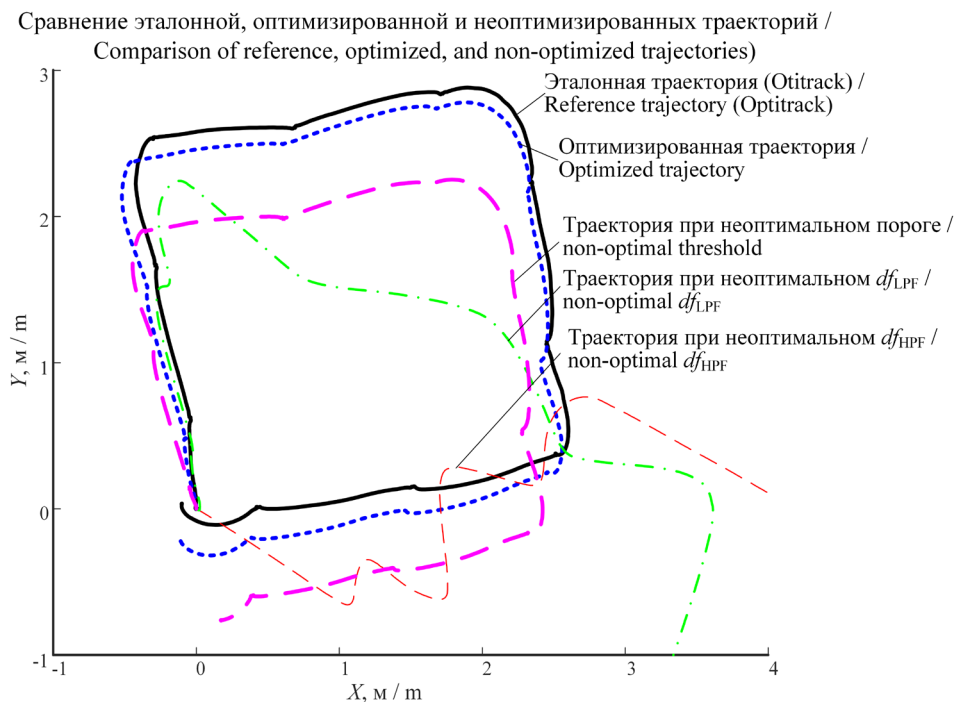


Рисунок 9 – Пример оптимизированной и эталонной траектории

Figure 9 – Example of optimized and reference trajectory

Совпадение оптимизированной и эталонной траекторий (рисунок 9) подтверждает высокую точность автоматизированного метода и его практическую применимость для задач реконструкции походки и других видов локомоции по данным инерциальных модулей. Проведенные эксперименты показали, что интеграция эволюционного алгоритма искусственного интеллекта с оптической системой существенно повышает точность восстановления траекторий, обеспечивая минимальные расхождения даже на сложных участках маршрута. Полученные результаты подтверждают перспективность метода для активной реабилитации, нейроинженерии, мониторинга двигательной активности и делают его универсальным инструментом для задач биомеханики и медицины движения.

Заключение

Разработана и экспериментально апробирована система автоматической оптимизации параметров фильтрации и обнаружения фаз шага по данным трёхосевого акселерометра, закреплённого на стопе. Ключевым элементом подхода стало использование эволюционного алгоритма искусственного интеллекта, обеспечивающего автоматизированный подбор уровня порога и частотных параметров на основе сравнения восстановленных траекторий с эталонными данными, полученными с помощью оптической системы захвата движений OptiTrack. Результаты показали, что внедрение эволюционного поиска существенно снижает ошибку восстановления траекторий шагов по данным инерциальных измерительных модулей, повышает точность обнаружения шага и обеспечивает быструю сходимость алгоритма к оптимальным решениям.

К основным преимуществам метода относятся: высокая точность и устойчивость благодаря автоматической адаптации параметров фильтрации и обнаружения фаз шага, что позволяет снижать погрешности; воспроизводимость за счёт исключения ручного подбора параметров; гибкость – алгоритм адаптируется к разным типам устройств.

Научная новизна исследования заключается во внедрении полностью автоматизированного процесса оптимизации параметров обнаружения фаз шага с применением эволюционного

искусственного интеллекта, что позволяет надёжно решать задачи мониторинга двигательной активности и объективной оценки параметров походки вне лабораторных условий. Полученные результаты открывают новые возможности для интеграции технологии в системы индивидуальной реабилитации, дистанционного контроля состояния, спорта, а также значительно расширяют потенциал носимых сенсорных систем и интеллектуальных медицинских костюмов для биомедицинских и прикладных исследований.

References /

Список использованных источников

1. Winter DA, Thomas SJ, Zeni JA. Winter's Biomechanics and Motor Control of Human Movement. Fifth Edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. 2023;384 p.
2. Yang CC, Hsu YL. A review of accelerometry-based wearable motion detectors for physical activity monitoring. *Sensors*. 2010;10:7772-7788. DOI: 10.3390/s100807772
3. Ortega-Bastidas P, Malagelada J, Vera-Garcia FJ, Prat-González S, Navarro-Flores E, Segura-Ortí E. Instrumented Timed Up and Go Test (iTUG) – More Than Assessing Time to Predict Falls: A Systematic Review. *Gait & Posture*. 2023;104:57-66. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2023.02.016
4. Jung S, Rauter G, Blöchliger M, Dietz N, Jeker R, Wolf P. A Machine Learning Pipeline for Gait Analysis in a Semi Free-Living Environment with Foot-Mounted IMUs. *Sensors*. 2023;23(8):20. DOI: 10.3390/s23084000
5. Dijkstra B, Zijlstra W, Scherder E. [et al.]. Detection of walking periods and number of steps in older adults and patients with Parkinson's disease: accuracy of a pedometer and an accelerometry-based method. *Age and Ageing*. 2008;37:436-441. DOI: 10.1093/ageing/afn097
6. Chen M, Zhang S, Liu Y, Guo Y, Zhu Q, Bai Y, Lin Y, Wei C, Zhang Y. A Systematic Review of Wearable Sensor-Based Technologies for Fall Risk Assessment in Community-Dwelling Older Adults. *Sensors*. 2022;22(18):6752. DOI: 10.3390/s22186752
7. Banos O, Galvez JM, Damas M. [et al.]. Window Size Impact in Human Activity Recognition. *Sensors*. 2014;14:6474-6499. DOI: 10.3390/s140406474
8. Song Z, Ou J, Shu L, Hu G, Wu S, Xu X, Chen Z. Fall Risk Assessment for the Elderly Based on Weak Foot Features of Wearable Plantar Pressure. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2022;30:1060-1070. DOI: 10.1109/TNSRE.2022.3167473

9. Xu L, Yang F, Li J, Mu Z, Xiao Z. Wearable Continuous Gait Phase Estimation During Walking, Running, Turning, Stairs, and Over Uneven Terrain. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*. 2024;6:1135-1146.

DOI: 10.1109/TMRB.2024.3407366

10. Bet P, Castro PC, Ponti MA. Foreseeing Future Falls with Accelerometer Features in Active Community-Dwelling Older Persons with No Recent History of Falls. *Experimental Gerontology*. 2021;143:111139.

DOI: 10.1016/j.exger.2020.111139

11. Wang Z, Zhao H, Qiu S. [et al.]. Stance-Phase Detection for ZUPT-Aided Foot-Mounted Pedestrian

Navigation System. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2015;20:2661-2669.

DOI: 10.1109/TMECH.2015.2430357

12. Хмарский П.А., Голубева С.А., Губкин С.В., Лемешко Е.В. Использование в медицинских исследованиях тактильного костюма Teslasuit с системой инерциального захвата движения // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2024. – № 2. – С. 41–52.

12. Khmarskiy PA, Golubeva SA, Gubkin SV, Lemeshko EV. Use of a Teslasuit tactile suit with an inertial motion capture system in medical research. *Nondestructive Testing and Diagnostics*. 2024;2:41-52. (In Russ.).

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-109-120

Distant Excitation of Rotating Surface Waves in Bodies with Cylindrical and Spherical Surface as Applied to Ultrasonic Control

A.R. Baev, A.V. Vorobei, A.L. Mayorov, M.V. Asadchaya, N.V. Delenkovsky

*Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus*

Received 24.04.2025

Accepted for publication 17.06.2025

Abstract

Increasing the efficiency of ultrasonic diagnostics and objects with curved surfaces, including cylindrical, spherical, etc., is an important scientific and technical task. The aim of the work was to develop a technique and experimentally investigate the excitation of surface rotating waves on cylindrical and spherical samples in contact with a metal substrate (support) using the proposed remote sounding method, where the substrate serves as an acoustic delay line for transmission-reception of signals between transducers and the object of investigation. The acoustic path of the suggested measuring scheme operating in shadow and echo modes has been analyzed and the dependences of the amplitude and velocity of the surface rotating waves excited in cylindrical steel and dural samples on their radius r , wave frequency ν and the number of revolutions n of the wave, while varying the angular wave number in the range $p = 2\pi r/\lambda = 20\text{--}125$ have been experimentally revealed. The quasi-linear growth of the wave attenuation coefficient from the sample diameter at frequencies $\nu = 1\text{--}5$ MHz has been experimentally established. The growth of the distance travelled by the wave is accompanied by a drop in the amplitude of the wave according to a law close to the exponential law, reaching the greatest attenuation with a decrease in r . The change in the surface rotating waves velocity in the specified range of variation p did not exceed 1.5–2 %, increasing with decreasing sample radius and wave frequency. The obtained experimental data on the peculiarities of changes in the parameters of acoustic impulses during the passage of surface rotating waves through the crack and the model coatings of the specimens indicate the possibility of using the proposed method for the control of objects of the specified shape.

Keywords: distant acoustic control, surface rotating waves (SRW), wave scattering (SAW) and coefficients of their passage and reflection, acoustic load body (ALB), wave amplitude and velocity

Адрес для переписки:

Баев А.Р.
Институт прикладной физики НАН Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

Address for correspondence:

Baev A.R.
Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

Для цитирования:

A.R. Baev, A.V. Vorobei, A.L. Mayorov, M.V. Asadchaya, N.V. Delenkovsky.
Distant Excitation of Rotating Surface Waves in Bodies with Cylindrical and Spherical Surface as Applied to Ultrasonic Control. Приборы и методы измерений. 2025. Т. 16. № 2. С. 109–120.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-109-120

For citation:

Baev AR, Vorobei AV, Mayorov AL, Asadchaya MV, Delenkovsky NV.
Distant Excitation of Rotating Surface Waves in Bodies with Cylindrical and Spherical Surface as Applied to Ultrasonic Control. *Devices and Methods of Measurements*. 2025;16(2):109–120.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-109-120

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-109-120

Дистанционное возбуждение вращающихся поверхностных волн в телах с цилиндрической и сферической поверхностью применительно к ультразвуковому контролю

А.Р. Баев, А.В. Воробей, А.Л. Майоров, М.В. Асадчая, Н.В. Деленковский

Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь

Поступила 24.04.2025

Принята к печати 17.06.2025

Повышение эффективности ультразвуковой диагностики объектов с криволинейной поверхностью, включая цилиндрическую, сферическую и др., является важной научно-технической задачей. Цель работы состояла в разработке методики и экспериментальном исследовании возбуждения поверхностных вращающихся волн на контактирующих с металлической подложкой (опорой) образцах цилиндрической и сферической формы, используя предложенный дистанционный способ прозвучивания, где подложка служит в качестве линии акустической задержки для передачи-приёма сигналов между преобразователями и объектом исследования. Проанализирован акустический тракт предложенной измерительной схемы, работающей в теневом и эхо режимах, и экспериментально выявлены зависимости амплитуды и скорости возбуждаемых в цилиндрических стальных и дюралевых образцах поверхностных вращающихся волн от их радиуса r , частоты волны ν и числа оборотов n волны, при варьировании углового волнового числа в диапазоне $p = 2\pi r/\lambda = 20\text{--}125$. Экспериментально установлен квазилинейный рост коэффициента ослабления волны от диаметра образца на частотах $\nu = 1\text{--}5$ МГц. Рост пройденного волной расстояния сопровождается падением амплитуды волны по закону, близкому к экспоненциальному, достигая наибольшего ослабления с уменьшением r . Изменение же скорости поверхностных вращающихся волн в указанном диапазоне варьирования p не превысило 1,5–2 %, возрастая с уменьшением радиуса образца и частоты волны. Полученные опытные данные об особенностях изменения параметров акустических импульсов при прохождении поверхностных вращающихся волн через трещину и модельные покрытия образцов свидетельствуют о возможности применения предложенного способа для контроля объектов указанной формы.

Ключевые слова: дистанционный акустический контроль, поверхностные волны (ПАВ), включая вращающиеся (ПВВ), рассеяние волн и коэффициенты их прохождения и отражения, тело акустической нагрузки (ТАН), амплитуда и скорость волны

Адрес для переписки:

Баев А.Р.
Институт прикладной физики НАН Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

Address for correspondence:

Baev A.R.
Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

Для цитирования:

A.R. Baev, A.V. Vorobei, A.L. Mayorov, M.V. Asadchaya,
N.V. Delenkovsky.
Distant Excitation of Rotating Surface Waves in Bodies with
Cylindrical and Spherical Surface as Applied to Ultrasonic Control.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 2. С. 109–120.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-109-120

For citation:

Baev AR, Vorobei AV, Mayorov AL, Asadchaya MV,
Delenkovsky NV.
Distant Excitation of Rotating Surface Waves in Bodies with
Cylindrical and Spherical Surface as Applied to Ultrasonic Control.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(2):109–120.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-109-120

Introduction

A significant number of objects of modern industrial production have curvilinear surface, including cylindrical, spherical, etc., non-destructive testing of which can be carried out by electromagnetic, current-vortex, ultrasonic and other methods, including visual and thermal [1]. So, the solution of a number of problems associated with the establishment of physical and mechanical properties of the surface layer of the object subjected to surface hardening [1], the presence of sinks, cracks, both emerging on the surface and located under it, as a rule, is carried out by placing the primary transducers near the object of control. Then the transducers move or scan the surface of the object, which affects the quality and reliability of control, its productivity. In particular, this applies to quite effective acoustic contact or immersion methods of control, using weakly damped Rayleigh surface waves (RW) or similar to them (in structure) as probing and excited by transducers with the angle of the piezoelectric transducers (PETs) prism $\beta = \arcsin(C/C_R)$, where C and C_R are the velocities of the longitudinal wave in the PET prism and Rayleigh wave in the substrate, respectively [1].

In addition, in some works carried out both abroad [1] and in Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus, small aperture PETs have been successfully used for wave scattering (SAW) excitation-reception [1]. With their help it is possible to determine the quality of the layer hardened by thermal or chemical-thermal treatment or its depth regardless of the ratio of SAW velocities in the base of objects having curved surfaces, as well as to assess the degree of damage to metals, the quality of coatings, etc. using correlation characteristics. Nevertheless, the disadvantage of the mentioned methods and means of control is that at "local" movement of the above transducers on the curved surface of the object the productivity and reliability of control is not high enough due to the need to ensure quality acoustic contact, orientation of the transducers, etc., as well as the need to ensure the quality of the acoustic contact. Despite the successes achieved through the use of new techniques and devices, including, for example, phased arrays [2, 3], as well as methods of mathematical processing of scattering fields on the defective structure, the expansion of technical capabilities and efficiency of SAW for the control

of a wide range of objects with curved surfaces is an important scientific and technical task.

Note also that the application of non-contact methods of control, including electromagnetic-acoustic and pulse-laser [5, 6], also have limitations due to the properties of the object and the complexity of the application of measuring instruments, for example, when coating the product, soldering, welding, hardening of the surface layer, etc. [5]. In this paper we suggest the idea of controlling objects with curved surfaces using surface rotating waves (SRW) by their distant excitation by Rayleigh waves. The latter are transmitted through a sound-conducting substrate (base) serving as a delay line between PETs and the object under investigation, which is an acoustic load body (ALB). It should be noted that a similar sounding scheme was previously applied by us to study the peculiarities of SAW passage through the boundary of sliding and rigid contact of the substrate surface and prism (also ALB) having different angles of inclination of side faces [7]. We studied the peculiarities of the influence of boundary conditions on the acoustic path with respect to the process of joining materials and showed that the shape of the prism has a significant influence on the function of SAW passage through the sliding contact region of these bodies and their "reflectivity" determined by the ratio of reflection coefficients from the above mentioned ALB contact boundaries.

In addition, scattering of SAW on the mentioned boundaries is accompanied by the appearance of SAW fluxes propagating along the side surfaces in the vertical plane of the prism towards each other. As it is supposed, a similar effect should appear in the case considered below – at the contact of a substrate with ALB having the form of a cylinder and a sphere. This area of acoustic contact in the main plane of section is similar to a liquid wedge. And one of its surfaces is curvilinear, which, naturally, should affect the amplitude parameters of scattered waves.

Thus, the results of our earlier studies concerning mainly the SAW passage through the sliding boundary of the substrate with ALB in the form of a prism [7, 8], as well as other works, for example [9, 10], aimed at studying the SAW propagation on a cylindrical surface with a source and receiver of waves located on it, served as a basis for the development of the proposed method of remote ultrasonic control of objects with a curved surface.

Experimental study setup and schemes

The scheme of experimental studies for modeling the distant method of excitation of rotating waves in objects with cylindrical and spherical surfaces for use in ultrasonic control is shown in Figure 1, where as sources and receivers of RW used PETs with a prism angle $\beta = 65^\circ$. For this purpose the shadow or echo method of object sounding can be used. So, in the first case for carrying out researches on a steel substrate 4 cm thick two PETs directed towards each other and operating at frequencies ν , MHz = 1, 2.5 and 5 are installed. To increase the reliability of acoustic contact and orientation of the PETs, they are held by a pair of magnets installed on both sides of the PETs. The samples serving as ALBs of cylindrical shape are placed symmetrically with respect to the acoustic axis, which is perpendicular to the main axis of the sample. Their orientation is achieved by using special stops, including magnetic ones. In this case, the surfaces of the samples are processed to the roughness class Ra not more than $1.6 \mu\text{m}$, and machine oil is used as a thin sound-conducting layer providing acoustic contact between the contacting bodies.

The electronic part of the scheme of the experimental setup contains as a source and receiver of SAW electric pulses the blocks of a standard flaw detector, including a generator with a pulse repetition rate of 1 kHz, their amplification block with the output of both undetected and detected informative signals on a RigolDS7024 device with a sampling frequency of 200 MHz and measurement of time intervals with an error up to ≈ 5 ns. As it was mentioned above, at realization of echo-mode of sounding the reference signal created by reflection of RW from the SAW reflector developed for this purpose in the form of a prism of a special form, installed in opposition to the source-receiver of SAW, between which the object of control is placed [7]. It is also very important to note that at preparation of the measuring process it is necessary to pay attention to creation of acoustic contact between a substrate and ALB for transfer of RW energy to ALB and back, which is made through a thin layer of liquid. In this application of the sound conductive layer, rotating waves are excited. In this case, by analogy with the data obtained by us earlier, we should expect some peculiarities of the transfer of the RW flow energy into the energy of rotating modes, depending on a number of factors, including the contact layer of the liquid.

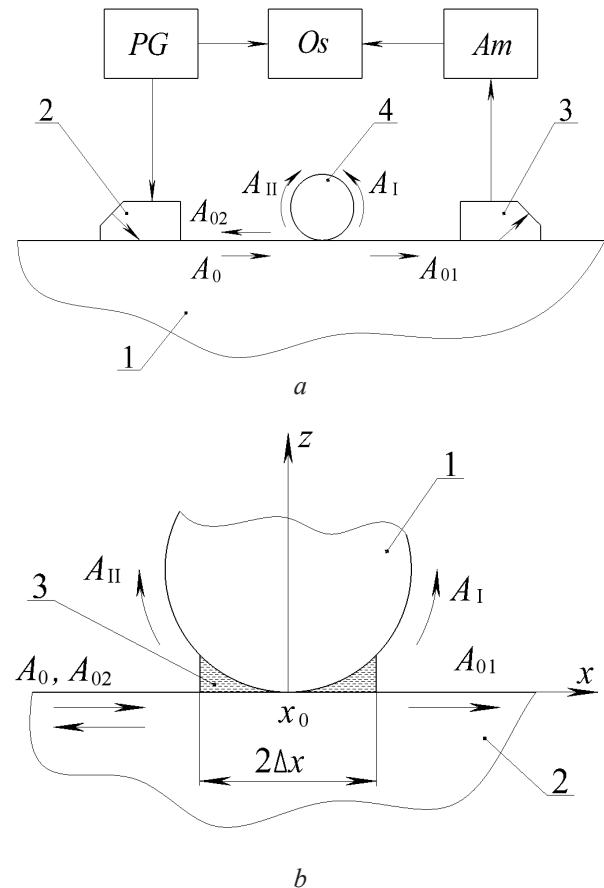


Figure 1 – Experimental scheme explaining the method of excitation by Rayleigh wave of rotating waves on objects with cylindrical and spherical surface (a) and peculiarities of Rayleigh wave propagation through the area of acoustic contact of contacting bodies (b). a: 1 – substrate; 2 and 3 – emitting and receiving transducers; 4 – research object or body of acoustic load of cylindrical, spherical or other similar shape; PG – pulse generator; Os – oscilloscope; Am – amplification unit of the received signal. b: 1 – acoustic load body; 2 – steel substrate; 3 – contact lubricant layer; surface wave amplitudes resulting from Rayleigh wave scattering with amplitude A_0 at the contact boundary of the bodies: amplitudes of the passed (A_{01}) and reflected (A_{02}) modes of the Rayleigh wave's, A_I and A_{II} – excited surface rotating waves, rotating counterclockwise and clockwise, respectively

The studies will be carried out in the following way. At first, the PETs are installed in opposition to each other, achieving optimal conditions of RW passage between them, if the sounding mode is shadow. In the other case, the PET, combining the function of an emitter and a receiver of RW, is orientated relative to a special reflector of surface waves, the principle of which is described in the paper [7], and then the ALB is installed to study the object according to the data of amplitude and time characteristics of the signal.

In order to study the possibility of excitation of SAW on spherically shaped objects, a similar installation to the one mentioned above was used as a basis, improved in order to study the amplitude and angle characteristics of scattered SAW, which is explained in Figure 6. As research objects demonstrating the possibilities of the method of controlling the defectiveness of objects of cylindrical shape were used metal samples with cracks and imitators of coatings and in the form of different thicknesses, made on a polymer base and covering half of the surface area of the samples with thicknesses from 22 to 430 μm .

The results of experimental studies and their discussion

The main results of experimental studies devoted to the study of the acoustic path and possibilities of remote control of objects with cylindrical and spheri-

cal surfaces with the help of SRW are explained in Figures 2–8. Thus, Figure 2 shows a characteristic oscillogram of a series of SRW pulses excited as a result of Rayleigh mode pulse scattering when it passes the area of acoustic contact of a cylindrical sample with a substrate. The peculiarities of changes in the amplitude characteristics of the SRW mode from the sample radius, wave frequency, number of revolutions, and distance travelled are illustrated in Figures 3 and 4.

Data on the influence of the angular wave number $p = 2\pi r/\lambda$ on the change of the SRW velocity in steel and duraluminium samples are shown in Figure 5, where λ is the Rayleigh wavelength. In Figure 6 shows the amplitude-angle dependences of the SAW scattering field of a spherical shaped sample, the surface of which is bypassed by the SRW in different directions. Figures 7 and 8 illustrates the possibility of detecting surface cracks remotely by both shadow and echo methods.

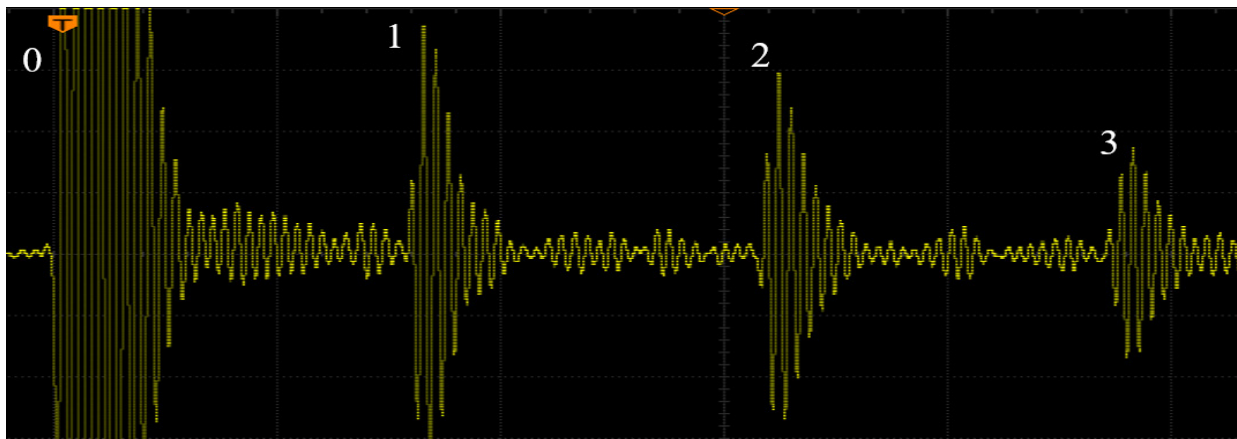


Figure 2 – Characteristic oscillograms of surface rotating wave pulses excited by the proposed "distant" method by Rayleigh wave on cylindrical samples in contact with steel substrate; sample diameter 15.08 mm, operating frequency of transducers $\nu = 1.8$ MHz; signs 1, 2 and 3 – correspond to pulses of the surface rotating wave with numbers – 1, 2 and 3, and sign 0 – corresponds to the reference signal received in the shadow mode of object sounding

Amplitude characteristics of the surface rotating waves

Experimental investigations were carried out on steel and dural samples of cylindrical and spherical shape depending on their diameter $d = 6.98$ – 25.1 mm and PET operating frequency ν , MHz = 1, 1.8, 2.5 and 5 MHz. So the main range of variation of the angular wave number was $p = 2\pi r/\lambda \approx 20$ – 125 , which allowed to reveal a number of features of both excitation and propagation of SRW. Thus, in the whole investigated range of wave number variation,

the RW passing through the contact boundary of an object or ALB with the substrate is accompanied by the excitation of two surface rotating waves (modes) directed towards each other, which is illustrated in Figure 1a). In the direction of the source propagates reflected from the region $\Delta x_0 < x^* < x_0 + \Delta x_0$ mode with energy $W_0 K_{ref}$. Thus, the formula for describing the energy balance is as follows:

$$\Delta W = W_0 - W_{pr} = W_0(1 - K_{pr}) = W_0(K_0 \uparrow + K_0 \downarrow + K_{ref}), \quad (1)$$

where W_{pr} is the energy of the RW mode passed through the contact region of the bodies; $K_0 \downarrow$ and

$K_0 \uparrow$ are the conversion coefficients RW→SRW for rotating modes clockwise and counterclockwise; K_{pr} and K_{ref} are the corresponding coefficients of the RW mode passage and reflection by energy from the specified region.

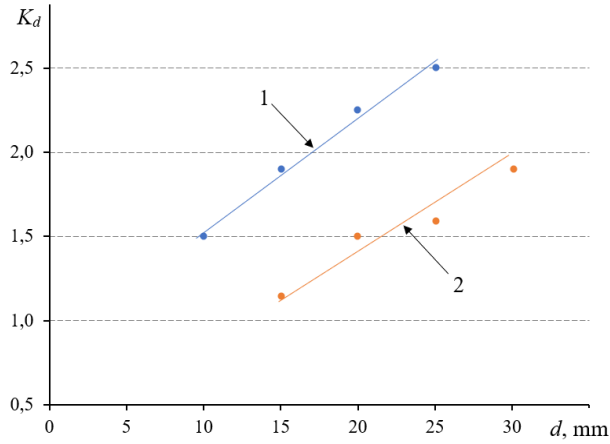


Figure 3 – Dependence of the attenuation coefficient of the relative amplitude of the rotating mode pulse amplitude $K_d = A_n / A_{n-1}$ on the cylinder diameter at the piezoelectric transducer operating frequency ν , MHz = 5 (1); 1 (2)

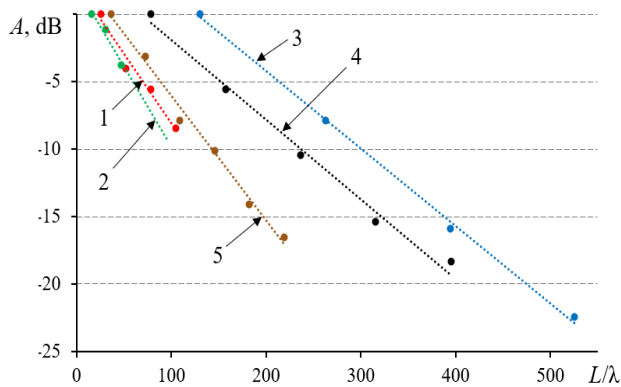


Figure 4 – Relative change of the surface rotating waves pulse amplitude propagating on the surface of steel cylinders depending on the traveled distance determined by the number of revolutions and the cylinder diameter: dependencies obtained at $\nu = 1$ MHz at d , mm = 25.1 (1) and 15.08 (2), and at $\nu = 5$ MHz at d , mm = 25.1 (3), 15.08 (4) and 6.98 (5)

It should be noted that, under certain conditions, the amplitude of the scattered RW modes, including SRW, can be influenced by the contact layer of the liquid, whose profile is similar to a wedge with a changing curvature of one of the surfaces. In this case, in the first approximation, the profile of the contact layer is determined by the surfaces limiting it – $z = 0$ and $z = z(x^*)$, dimensionless height of which

$$h_\lambda = h(\lambda_{in})^{-1} = r(\lambda_{in})^{-1} [1 - [1 - (\Delta x/r)^2]^{0.5}], \quad (2)$$

where λ_{in} is the length of excited elastic waves. In the case when $\Delta x/r \ll 1$, then $h_\lambda \approx \Delta x^2 (\lambda_{in} r)^{-1}$. Thus, when optimizing the conditions of acoustic measurements it is necessary to take this parameter into account in order to reduce the noise background and increase the stability of measurements.

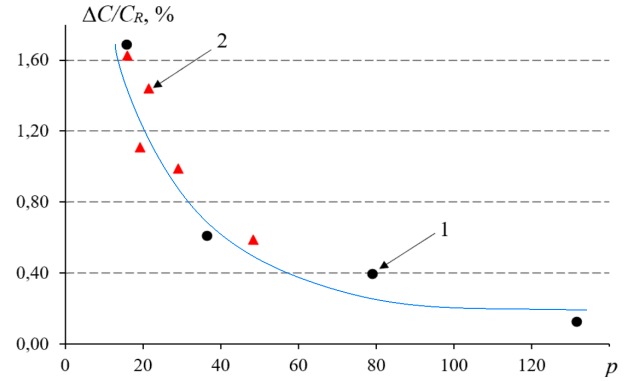


Figure 5 – Variation of the velocity of the rotating surfactant according to the data of the time it circles the surface of a cylindrical sample as a function of the angular wave number $p = 2\pi r/\lambda$; sample material steel (1) and dural (2)

It has been experimentally established that at achievement of optimum conditions providing the minimum noise background at maximum amplitude of SRW impulses circling the ALB surface and maintenance of a certain ratio between amplitudes, stability of readings, it is the mode rotating counterclockwise that prevails. In most cases its amplitude A_I exceeds the amplitude of A_{II} by 5 and more times. Experimental estimation of A_I and A_{II} was carried out by using developed small aperture and miniature inclined PETs placed directly on the surface of ALB or near its substrate. At realization of the mentioned conditions, Figure 2 serves as a confirming example, where an oscillogram of SRW mode impulses registered by the receiving PET at making the next turn and passing of waves through the area of contact between ALB and substrate is given.

It should be noted that similar oscillograms are observed in the case when steel spheres serve as ALBs. However, as it is established, there is a difference between them caused by inversion of the wave phase by the value $\Delta\phi \rightarrow \pi$ when a cylinder serves as a ALB. If the object is a sphere, on the other hand, there is no shift. Obviously, it is necessary to take this into account when making measurements using the phase characteristics of the probing signal.

The investigations of amplitude dependences of SRW on the ALB diameter (Figure 3) and the passed distance (Figure 4) at the operating frequencies of 1 and 5 MHz allowed to establish the following. First of all, the amplitude of impulses of the rotating mode depending on the traveled distance $L = 2\pi rn$ decrease according to the law close to the exponential one, which is illustrated by dependences 1–5 in Figure 4, where A is the normalized amplitude and λ is the RW wavelength.

Note also, the measured wave amplitude attenuation coefficient as a function of diameter is a linearly increasing function, i. e., $K_d = A_n/A_{n-1} \sim d$, or $K_d/d = \text{const}$ at operating frequencies of 5 and 1 MHz. Moreover, as can be seen, the attenuation of the wave amplitude with lower frequency is significantly lower, by ≈ 50 –80 %. From the analysis of the mechanism of energy losses (formulas 1 and 2) and experimental data, it should be concluded that the amplitude of the surface wave that has passed the path $L = 2\pi rn$, having made n revolutions, can be represented in the form:

$$A_n \sim A_0 D_p \varepsilon \left(\prod_{n=1}^n D_n f_n \right), \quad (3)$$

where A_0 and D_p are the RW amplitude emitted by the PET and the coefficient of its passage of the ALB-substrate contact boundary when moving along x to the receiving PET, respectively; ε is a correction factor characterizing the peculiarities of the mechanism of transferring part of the RW energy to the rotating wave directly when the initial RW pulse moves along the substrate; D_n is the coefficient of passing by the rotating wave of the acoustic contact area of $x \in x_0 \pm \Delta x_0$ bodies, and f_n is the coefficient of attenuation of the wave amplitude caused by the wave front divergence during the n^{th} rotation. It follows from (3) that $K_d = D_n f_n$.

Analyzing peculiarities of the mechanism of interaction of the rotating mode at passing the area of acoustic contact of ALB-substrate, it should be assumed that the most significant mechanism of attenuation of the wave amplitude is caused exactly by dissipation of its energy at passing each time the area of acoustic contact of ALB with substrate. And the more turns the wave makes, the more these losses are, which follows from formula (3).

On the change of the surface rotating waves velocity

To study the possibility of using as an informative parameter the velocity C of SRW propagation

using the proposed remote sensing method and to compare these data with the known (mainly theoretical) data [11], the shadow mode of sounding at frequencies ν , MHz = 1, 2.5 and 5 MHz, and varying the angular wave number almost 6 times – $p = 2\pi r/\lambda = 20$ –125 was used. The material of the samples was steel and dural. The experimental scheme shown in Figure 1 was used for measurements, where the object was placed between the emitting and receiving PETs. Moreover, the signal reception and processing was performed with the help of RIGOLLS7024 device with integrated electron beam tube. Figure 5 presents the results of the study of the SRW velocity estimated from the data of the time Δt between the pulses received by the PET when the wave makes one or several revolutions of the cylinder surface. In this case, each time the wave velocity was measured 3–4 times, and it was determined by the formula: $\Delta C = L/\Delta t - C_R$, where C_R is the Rayleigh wave velocity measured on a flat sample with an error not worse than 0.2 %. It was found that $\delta = \Delta C/C_R$ is an increasing function with decreasing numerical parameter p for both steel and dural samples.

However, the value of δ did not exceed 1.5–2 %, which qualitatively agrees with the theoretical conclusions of work [11], where it is shown that the additional change (growth) of the velocity $\Delta C/C_R \sim p^{-2} \sim \lambda^2 r^{-2}$ measured by us is due to the effect of wave dispersion.

According to known theoretical data [11], it was found that when propagating along a convex cylindrical surface, SAW has dispersion – the dependence of velocity on frequency. In [11], a theoretical analysis of the dependence of phase and group velocities is carried out and states their dependence on the angular wave number $p = 2\pi r/\lambda$ (r is radius of the cylinder; λ is length of the ultrasonic wave). According to [11], a Rayleigh-type surface wave propagates along a convex cylindrical surface, and when the diameter of the convex surface tends to infinity, the phase and group velocities tend to the Rayleigh wave velocity, all particle displacements are also identical. Accordingly, as the frequency increases, the phase and group velocities also tend to the Rayleigh wave velocity. In the first approximation, the phase velocity of a propagating ultrasonic wave on a convex cylindrical surface is proportional to $1/(k_R r)$, where k_R is the wave number.

Surface rotating waves in a spherically shaped sample

Experimental studies carried out according to the previous scheme (Figure 1) also allowed us to establish the high efficiency of excitation of waves rotating along the spherical surface excited by Rayleigh waves in steel balls. As it was found, in contrast to the case of excitation of a surface mode on a cylinder, no phase shift for the spherical surface rotating mode was detected. To investigate the scattering field of SRW excited on a spherical surface, the setup was modified (Figure 6a). In this case, we studied the features of the formation of the scattering field of such modes, the rotation trajectory of which has a significant difference from those studied earlier. The difference consists in obtaining and analyzing

not only amplitude, but also amplitude-angle characteristics of $A_n(\varphi)$ in the plane of the substrate surface $z = 0$ waves, where the index n coincides with the pulse number of the investigated rotating mode circling the sphere surface. The studies were carried out by shadow method, and the change of the angle of reception was achieved by moving the PET with an operating frequency of 2.5 MHz along a circular trajectory, directing its plane of wave incidence to the point of contact of the sphere with the plane of the substrate $x = x_0$. So the distance between the PET and the point x_0 was $s = 55$ mm. The angular dependence of the reference signal $A_{n0}(\varphi)$ obtained at $n = 0$ is also plotted. So the path traveled by the SRW when receiving the n^{th} pulse of the wave will increase.

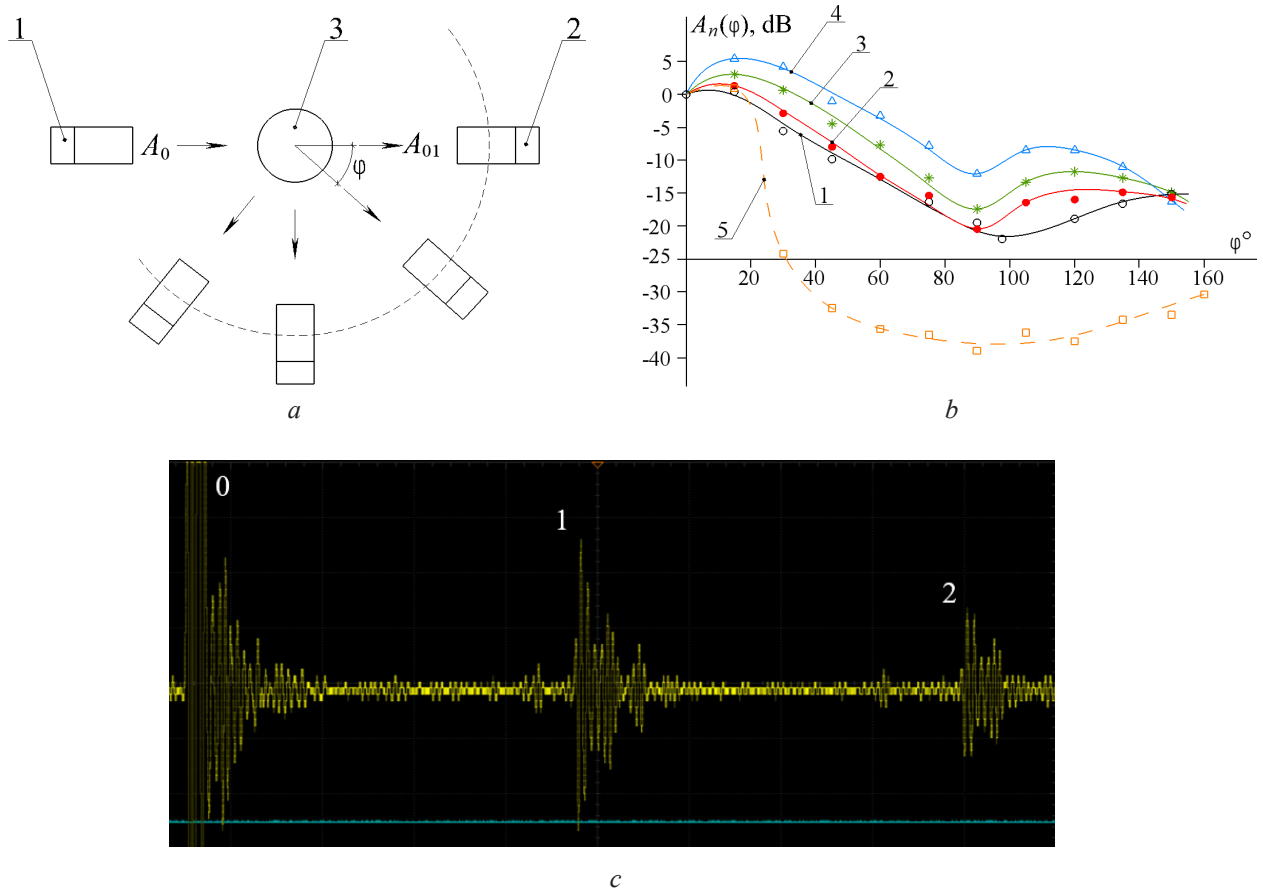


Figure 6 – Schematic diagram of the experimental setup for studies of the scattering field of surface waves scattering by a steel sphere (a), amplitude-angle dependences of the amplitude of pulses of waves $A_n(\varphi)$ (b) and oscillograms of the surface rotating wave pulses on the spherical sample (c). a: 1 and 2 – emitting and receiving transducers; 3 – steel sphere; b: curves 1, 2, 3 and 4 correspond to the values of the number n of the surface rotating wave impulse sequentially traveling around the sphere surface; 5 – dependence obtained in the absence of Rayleigh wave rounding of the sample surface; c: signs 1 and 2 correspond to surface rotating wave pulses with numbers 1 and 2 registered by the receiving transducer, sign 0 corresponds to the reference signal obtained in the shadow mode of object sounding; sphere diameter 25.44 mm, operating frequency of transducers $\nu = 2.5$ MHz

The studies have shown that the shape of the oscillograms of the fixed pulses when changing the angle of signal reception from zero to $\varphi = 20\text{--}30^\circ$ and varying the number of the pulse number n , coinciding with the number of the wave rotating on the sphere surface, is similar to that for the SRW modes illustrated in Figure 2. At the same time, they differ in the absence of wave phase inversion for adjacent pulses, which takes place in the case of SRW excitation on cylindrical samples. These data indicate the possibility of ultrasonic diagnostics and control of such objects, using not only the speed, but also the amplitude of remotely excited.

As for the scattering field of n -fold waves circling the sphere surface after their exit to the substrate plane in the vicinity of $x \rightarrow x_0$, their expansion and amplitude decrease are observed as n increases. As can be seen from Figure 6, a weakly pronounced minimum and two lateral maxima – $A_{\max 1}$ and $A_{\max 2}$, located in the vicinity of the angles $\varphi = \pm(10\text{--}15^\circ)$, are found in the vicinity of $\varphi \rightarrow 0$. On the other hand, two additional field minima located in the vicinity of $\varphi = \pm(90\text{--}95^\circ)$ were detected. At the same time, the difference in amplitude between these extrema is $\approx 17\text{--}22$ dB, which is characteristic of the scattering fields of small aperture sources [1].

The following factors can affect the course of the indicated dependences of the scattering fields $A_n(\varphi)$. First, as n grows, the distance from the source of the scattering field to the receiver will increase significantly due to the wave's additional round-trip distance $\Delta s = 2\pi rn$:

$$S_n = S_0 + 2\pi rn. \quad (4)$$

Secondly, it concerns the boundary conditions affecting the process of transferring part of the Rayleigh mode momentum energy to the spherical body, where, as it is supposed, as in the case considered above, SRW of different directions should be generated.

About detection of surface defects

Figures 7 and 8 show the results of ultrasonic inspection of a steel cylinder with a longitudinal crack with a depth of 0.8–0.9 mm and opening 0.03–0.05 mm, sample diameter 15.96 mm, ultrasonic wave frequency 5 MHz. Figure 7 shows the oscillograms of pulses obtained during the control by echo method with the use of an artificial (reference) reflector in the form of a prism, located so that the ALB is installed between the PET and the prism. The arti-

ficial reflector provides registration of SRW pulses rotating counterclockwise (Figure 1a). In the absence of a crack, only counterclockwise rotating SRW pulses are observed (2, Figure 7a), as well as the Rayleigh wave pulse reflected by the substrate-cylinder contact region (0, Figure 7a). The presence of the crack leads to partial reflection of the SRW from its surface, which provides pulse registration without an artificial reflector due to the change in the direction of the rotating mode (3 and 4, Figure 7b). The fraction of energy that passes through the crack is registered with the help of an artificial reflector, a decrease in the amplitudes of the ABI pulses that passed through the crack is observed (2, Figure 7b). The criterion for the presence of a defect in the echo method is the appearance of a series of SRW pulses reflected from the crack surface (3 and 4, Figure 7b), with a simultaneous decrease or disappearance of the series of pulses that passed through the crack (2, Figure 7b).

Figure 8 shows the oscillograms of the pulses obtained during shadowing (Figure 1a), with only counterclockwise rotating modes recorded. In the absence of a crack, there is a series of SRW pulses rotating counterclockwise (1–5, Figure 8a), as well as a reference pulse of Rayleigh wave propagating in the substrate and passing the area of contact "ALB-substrate" (0, Figure 8a). The presence of a crack leads to a decrease in the energy of the SRW mode that passed through the crack, as a result, a decrease or disappearance of signals on the oscillogram is observed (1 and 2, Figure 8b). The criterion for the presence of a defect in shadow inspection is the decrease and disappearance of the SRW pulses that passed through the crack (1 and 2, Figure 8b).

The possibility of using SRW for controlling the surface structure of solid bodies having cylindrical and spherical surfaces at different hardening methods (hardening, cementation, etc.) has been established. In this case, two objects of cylindrical or spherical shape are used in the control: one of which is controlled, the second is a reference used as a carrier of the controlled parameter (diameter, thickness or quality of the hardened layer, etc.). It should be noted that the SRW generated on both ALBs passes the same path and the receiving PET, in the shadow mode, registers their total interference pulse. If in the object the controlled parameter differs from the reference one, then a phase shift occurs between the SRW pulses of cylinders (spheres), which leads to the change of amplitude distribution in the series of registered SRW pulses.

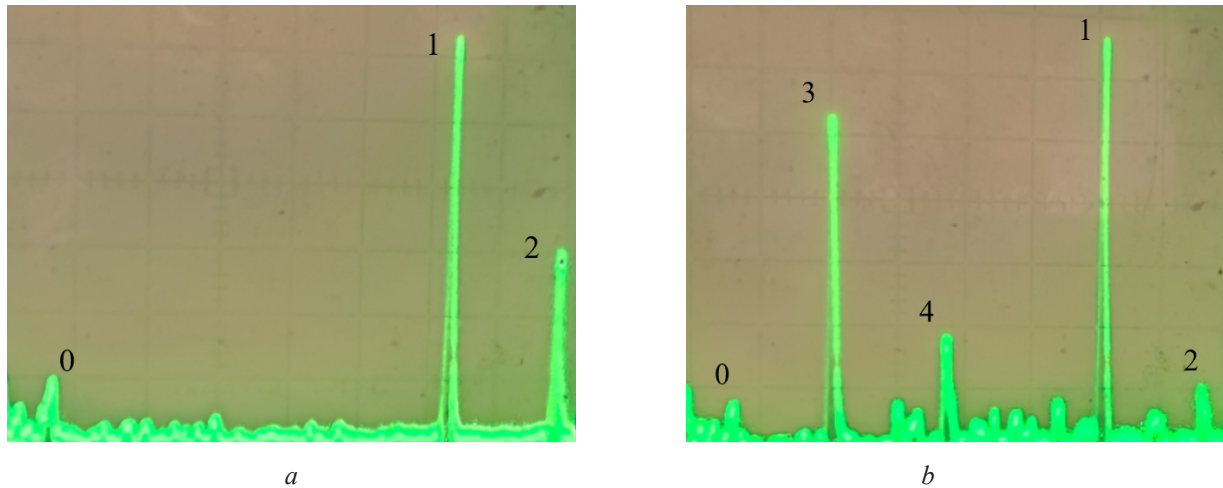


Figure 7 – Oscillograms of pulses obtained during detection of a defect in the form of a crack by a surface rotating wave on a cylindrical steel sample in echo-mode in the absence (a) and presence (b) of the defect: 0 – Rayleigh wave pulse reflected by the area of contact "substrate-cylinder" and from the artificial reflector (1, 2), where 2 – pulse delayed by additional rounding of the sample perimeter; 3 and 4 – impulses of a surface rotating wave reflected from a crack without a crack (a) and in the presence of a crack (b); transducer operating frequency 5 MHz, sample diameter 15.96 mm, and crack opening 0.03–0.035 mm at its depth 0.8–0.9mm

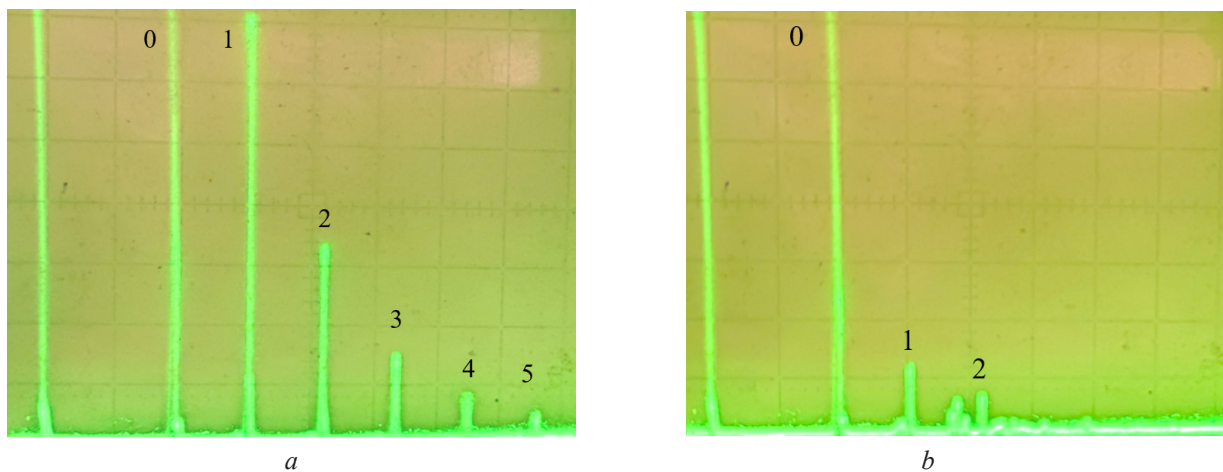


Figure 8 – Oscillograms of pulses obtained during the detection of a defect in the form of a crack by a surface rotating wave on a cylindrical steel sample in the shadow mode in the absence (a) and presence (b) of the defect: 0 – reference pulse of Rayleigh wave; 1–5 – pulses of rotating mode without attenuation by the crack (a) and in the presence of it (b); transducer operating frequency 5 MHz, sample diameter 15.96 mm, crack opening 0.03–0.035 mm at its depth 0.8–0.9 mm

Studies of the possibility of controlling the defectiveness of cylindrical objects with cracks have been carried out, with simulated coatings of different thicknesses, made on a polymer base and covering half of the surface area of the samples with thicknesses from 22 to 430 μm . It was found that the presence of the coating leads to a decrease in the amplitude of the rotating mode pulses, and the

amplitude for the given coatings does not change monotonically depending on the thickness. Increasing the thickness of polymer coatings on the ALB surface leads to a monotonous decrease in the rotating mode velocity. Presence of coating on controlled objects allows to carry out their control by SRW modes by the proposed remote method of sounding.

Conclusion

A remote method of sounding and control of cylindrical and spherical objects by means of surface rotating waves excited in them is proposed. The controlled objects are placed on a metal substrate, which serves as an acoustic delay line for transmission-reception of signals between transducers and the object of study, which is a body of acoustic load. Piezoelectric transducers with prism angle $\beta = 65^\circ$ are used as sources and receivers of Rayleigh wave, shadow or echo method of object sounding is used.

It has been established that as a result of Rayleigh wave scattering in the area of contact between the substrate and the object, surface modes rotating in opposing directions are generated in the latter. When the optimal mode of sounding is realized, the amplitude of the counterclockwise rotating A_I mode exceeds the amplitude of the A_{II} wave moving in the oppositional direction by a factor of 5 or more.

It is shown that the main parameter affecting the acoustic path of the proposed measurement scheme is the angular wave number $p = 2\pi r/\lambda$. The quasi-linear growth of the wave attenuation coefficient from the sample diameter at frequencies $\nu = 1\text{--}5$ MHz has been experimentally established. The growth of the distance traveled by the wave is accompanied by a drop in the amplitude of the wave according to the law close to the exponential law, reaching the greatest attenuation with a decrease in the radius of the cylinder (sphere). The change in the surface rotating waves velocity in the specified range of variation of p did not exceed 1.5–2 %, increasing with decreasing sample radius and wave frequency, which is due to the effect of wave dispersion.

Based on the analysis of the acoustic path and experimental data, an expression for the dependence of the amplitude of the surface rotating mode, which has made n revolutions on the surface of a cylinder with radius r , on the distance traveled $L \sim rn$ is obtained. It is supposed that in most cases the most significant attenuation of the surface rotating waves amplitude is achieved as a result of its energy dissipation in the area of acoustic contact between acoustic load body and substrate.

The peculiarities of scattering fields of surface acoustic pulses by a metallic sphere when its surface is bypassed by a rotating mode depending on the

pulse number n and the angle of reception φ have been revealed for the first time. It is established that the scattering fields of waves rounding the surface of the sphere after their exit to the substrate plane expand with increasing n . Moreover, in the vicinity of $\varphi \rightarrow 0$ there is a weakly expressed amplitude minimum and two lateral maxima. In addition, two additional field minima located in the vicinity of $\varphi = \pm(90\text{--}95^\circ)$ were found.

Experimental modeling of the possibility of control of surface cracks and coatings by rotating surface waves using both shadow and echo methods realized with the use of surface wave reflectors has been carried out. In this case, the amplitude or velocity of the rotating mode propagation can serve as an informative parameter characterizing the state of the surface layer and its defectiveness.

The methodology is developed and the possibility of distant scheme of sounding and effective control of solid bodies having cylindrical and spherical surface for the presence of surface defects is established. Surface rotating waves modes also allow to control the surface structure at various methods of hardening (hardening, carburizing, laser thermal hardening, etc.).

References

1. Non-destructive testing: Reference // ed. V.V. Klyuyev, vol. 3, Moscow, Mashinostroyeniye Publ. 2006;859 p.
2. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Publisher: Waltham, MA: Olympus NDT, 2007.
3. Ginzel E. TOFD – Diffraction-time method of ultrasonic flaw detection. Basic principles and practical guidelines for application. M.: DPK Press. 2021;312 p.
4. Vopilkin AK, Badalyan VG, Bazulin EG, Bazulin AE, Tikhonov DS. Non-destructive testing. Ultrasonic methods. Digital coherent technologies. Defectometry. Moscow, Spektr Publ. 2025;640 p.
5. Chabanov VE, Zhukov VA. Calculation and design of EMAT for ultrasonic nondestructive testing. Instruments and techniques of physical experiment. 2014;201(3):57-72.
6. Aleshin NP, Krysko NV, Kusyy AG. [et al.]. Investigating the Detectability of Surface Volumetric Defects in Ultrasonic Testing with the Use of Rayleigh Waves Generated by an Electromagnetic-Acoustic Transducer. Russ J Nondestruct Test. 2021;(57):361-368.

7. Baev AR, Panteleenko FI, Zakharenko VV, Razmyslovich GI, Lark KG, Gill NN. Transformation and scattering of surface waves on the acoustic load to ultrasonic evaluation and measurements. Part 1. The boundary of acoustic contact is sliding. *Devices and Methods of Measurements*. 2018;9(1):28-39. (In Russ.).

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-28-39

8. Baev AR, Asadchaya MV. Specific Features of Excitation and Propagation of Longitudinal and Transverse Subsurface Waves in Solids: I. Waves in Objects with a Free Plane Boundary. *Russ J Nondestruct Test*. 2005;(41):567-576.

9. Dymkin GY, Kirikov AV, Bondarchuk KA. Immersion Testing of Curved Profile Objects by Surface Ultrasonic Waves. *Russ J Nondestruct Test*. 2022;(58):679-688.

DOI: 10.1134/S1061830922080034

10. Bondarchuk KA, Dymkin GYa, Kirikov AV. Investigation of time shadow method of ultrasonic control by surface waves. St. Petersburg. Theses of reports "Methodology of ultrasonic control: foundation and modern superstructure". 2025;119-120 pp. (In Russ.).

11. Viktorov IA. Sound surface waves in solids. Moscow, Nauka Publ. 1981;289 p.

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-121-132

Метод начального определения орбиты космического объекта по ограниченным данным угловых оптических измерений

В.С. Баранова, А.А. Спиридонов, Д.В. Ушаков, В.А. Саечников

Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь

Поступила 11.03.2025

Принята к печати 06.05.2025

В настоящее время представляют прикладную ценность задачи начального определения орбиты космических объектов по измерениям угловых координат (прямого восхождения и склонения) в условиях ограниченного количества данных. Целью работы являлась разработка безытерационной оценки вектора наклонной дальности неизвестного космического объекта относительно пункта наблюдения в условиях ограниченного количества данных угловых оптических измерений для определения орбитальных параметров (большая полуось, наклонение, эксцентриситет, долгота восходящего узла и аргумент широты) в режиме близком к реальному времени. Это является актуальным при решении задач оперативного определения орбит неизвестных космических объектов для предотвращения аварийных сближений и возможных столкновений, особенно в условиях роста числа запускаемых спутников и увеличения плотности космического мусора на низких околоземных орбитах. Представлен метод начального определения орбиты (в отсутствии данных об орбитальных параметрах) неизвестного космического объекта по угловым оптическим измерениям на короткой дуге наблюдений ($<0,5^\circ$) в двух областях обнаружения. Предложенный метод даёт возможность оценить вектор наклонной дальности неизвестного космического объекта относительно пункта наблюдения на основе данных угловых измерений и расчётных значений проекции величины скорости на плоскость кадра опорного спутника (с известными орбитальными параметрами). Для оценки величины проекции линейной скорости на плоскость кадра используется метод обнаружения космических объектов в видеоданных оптической системы наблюдения. В результате экспериментальных оптических наблюдений для обнаруженной ступени ракетносителя SL-12/RB, проведены угловые измерения и рассчитаны орбитальные параметры. Абсолютные ошибки в определении параметра большой полуоси ступени ракетносителя SL-12/RB, не превысили 19,71 км. Абсолютная ошибка параметра наклонения орбиты i ступени ракетносителя SL-12/RB составила $0,033^\circ$, долготы восходящего узла $\Omega - 0,083^\circ$ и аргумента широты $u - 0,046^\circ$.

Ключевые слова: космический объект, оптические измерения, орбитальные параметры

Адрес для переписки:

Баранова В.С.
Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: vbaranova@bsu.by

Address for correspondence:

Baranova V.S.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: vbaranova@bsu.by

Для цитирования:

В.С. Баранова, А.А. Спиридонов, Д.В. Ушаков, В.А. Саечников.
Метод начального определения орбиты космического объекта по ограниченным данным угловых оптических измерений.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 2. С. 121–132.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-121-132

For citation:

Baranova VS, Spiridonov AA, Ushakov DV, Saetchnikov VA.
Initial Orbit Determination of a Space Object from Limited Angular Optical Measurements.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(2):121–132. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-121-132

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-121-132

Initial Orbit Determination of a Space Object from Limited Angular Optical Measurements

V.S. Baranova, A.A. Spiridonov, D.V. Ushakov, V.A. Saetchnikov

Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus

Received 11.03.2025

Accepted for publication 06.05.2025

Abstract

Currently, the problem of initial orbit determination for space objects based on angular coordinate measurements (right ascension and declination) under limited data conditions is of significant practical value. The aim of this work was to develop a non-iterative estimation method for the slant range vector of an unknown space object relative to an observation site under conditions of limited angular optical measurement data, enabling near-real-time determination of orbital parameters (semi-major axis, inclination, eccentricity, longitude of the ascending node, and argument of latitude). This is particularly relevant for operational orbit determination of unknown space objects to prevent hazardous close approaches and potential collisions, especially given the increasing number of satellite launches and the growing density of space debris in low Earth orbit. A method for initial orbit determination (in the absence of prior orbital data) of an unknown space object is presented, based on angular optical measurements over a short observation arc ($<0.5^\circ$) in two detection regions. The proposed method allows for the estimation of the slant range vector of an unknown space object relative to the observation site using angular measurement data and computed values of the velocity projection onto the frame plane of a reference satellite (with known orbital parameters). To estimate the velocity projection onto the frame plane, a method for detecting space objects in optical surveillance system video data is employed. Experimental optical observations of the detected SL-12/RB rocket stage were performed, including angular measurements and orbital parameter calculations. The absolute errors in determining the semi-major axis of the SL-12/RB rocket stage did not exceed 19.71 km. The absolute errors in orbital inclination i , longitude of the ascending node Ω , and argument of latitude u were 0.033° , 0.083° , and 0.046° , respectively.

Keywords: space object, optical measurements, orbital parameters

Адрес для переписки:

Баранова В.С.
Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: vbaranova@bsu.by

Address for correspondence:

Baranova V.S.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: vbaranova@bsu.by

Для цитирования:

В.С. Баранова, А.А. Спиридонов, Д.В. Ушаков, В.А. Сачечников.
Метод начального определения орбиты космического объекта по ограниченным данным угловых оптических измерений.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 2. С. 121–132.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-121-132

For citation:

Baranova VS, Spiridonov AA, Ushakov DV, Saetchnikov VA.
Initial Orbit Determination of a Space Object from Limited Angular Optical Measurements.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(2):121–132. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-121-132

Введение

В настоящее время представляют прикладную ценность задачи начального определения орбиты по измерениям угловых координат в условиях ограниченного количества данных. К условиям ограниченного количества данных относятся наблюдения, при которых число точек измерения углового орбитального положения космического объекта меньше трёх. Наиболее актуальными в данной области являются задачи оперативного обнаружения неизвестных космических объектов, например, объектов космического мусора после распада или столкновения, а также задачи оперативного определения параметров орбит неизвестных космических объектов для предотвращения аварийных сближений и возможных столкновений [1]. Классические методы Лапласа, Гаусса, двойной r -итерации, метод Гудинга, а также их различные модификации позволяют найти устойчивое решение задачи определения орбиты по трём и более угловым оптическим измерениям в некоторые моменты времени [2, 3]. Каждый из этих методов решает основную проблему определения орбиты по угловым данным – отсутствие информации о дальности до объекта, что является ключевым ограничением оптических систем наблюдения, как одних из самых прецизионных [4]. Что же касается условий, когда количество данных измерений не достаточно, а измерение дальности отсутствует, то используются методы с вероятностной статистикой и моделями рекурсивной фильтрации [5]. Условия ограниченных данных характерны для работы с астероидами, а в последнее время предельно актуальны в наблюдениях за образованием космического мусора и обнаружении последствий космических событий (взрывы, распады, столкновения) [6–8]. Для подобных задач нашли применение методы основанные на ассоциации триклетов [9], которые включают модели вероятностного анализа и на данный момент активно внедряются в оптические системы наблюдения за космическим пространством [10, 11]. Такие методы представляют сложность в подборе параметров и критериев модели вероятностного анализа и являются частными для отдельных условий наблюдений.

Цель предложенного исследования – разработать метод начального определения, который позволяет по угловым измерениям только в двух областях обнаружения неизвестного космического объекта однозначно рассчитать параметры орбиты на основе оценки проекции величины скорости на плоскость кадра.

Метод и средства обнаружения

В работе [12] детально представлен метод обнаружения космических объектов в видеоданных оптической системы наблюдения, который включает оценку величины проекции линейной скорости на плоскость кадра, что в свою очередь даёт возможность оценить наклонную дальность неизвестного орбитального объекта. Метод обнаружения формализуется задачей установления наличия или отсутствия сигнала интенсивности космического объекта и заключается в обработке видеопотока с использованием набора согласованных фильтров. Наборы согласованных фильтров строятся на основе связи формы Фурье спектра разностного кадра и величины проекции линейной скорости движения на плоскость наблюдения. Основной целью разработки и исследования такого метода обнаружения является стремление снять ограничение с методов решения задачи начального определения орбиты, основанных только на угловых данных, где отсутствует информация о дальности до космического объекта. Общий алгоритм обработки данных входной видеопоследовательности для решения задачи обнаружения представлен на рисунке 1.

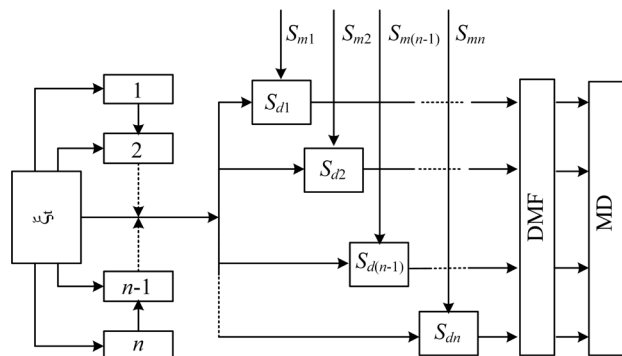


Рисунок 1 – Схема алгоритма обработки данных входной видеопоследовательности для решения задачи обнаружения

Figure 1 – Flowchart of the algorithm for processing input video sequence data to solve the detection problem

Согласно схеме рисунка 1 входная последовательность видео потока с числом кадров K делится на N подпоследовательностей. Для каждой подпоследовательности формируется разностный кадр вычитанием накопленных сумм k кадров. Разностные кадры этих подпоследовательностей делятся на блоки размером $m \times m$. Затем для каждого отдельного блока разностного кадра рассчитывается амплитудный спектр. Амплитудные спектры блоков и наборы согласованных фильтров (масок) используются для получения значений пространственной корреляции. Функция принятия решений (DMF – *Decision-Making Function*) на основе максимума корреляции и оценочных метрик сигнальной и шумовой функций маски и области детектирования устанавливает параметр наличия или отсутствия сигнала. Критерий минимального расстояния (MD – *Minimal Distance*) используется для оценки корреляционных образов и выбора оптимального решения, если неизвестный космический объект был детектирован в одной и той же области несколькими согласованными фильтрами (масками). Другими словами, метрика исключения ложных срабатываний и оценки корреляционного образа используется для определения наиболее оптимального выбора при обнаружении неизвестного космического объекта в некоторой области $n > 1$ количеством согласованных фильтров.

Представленный метод обнаружения с оценкой величины проекции скорости в плоскости кадра позволил разработать метод начального определения орбиты космических объектов для ограниченного количества угловых оптических измерений. Используются две области детектирования и угловые измерения в двух близко расположенных точках для каждой области. Под областью детектирования подразумевается область наведения оптической системы. Согласованная ассоциация величины скорости в плоскости кадра неизвестного космического объекта с опорным спутником известной орбиты даёт возможность вычислить два радиус-вектора на короткой дуге одного пролёта, что достаточно для расчёта вектора скорости и однозначного определения орбиты.

В качестве источника данных используется мобильная оптическая система наблюдения Белорусского государственного

университета [13], основные элементы которой представлены на схеме рисунка 2.

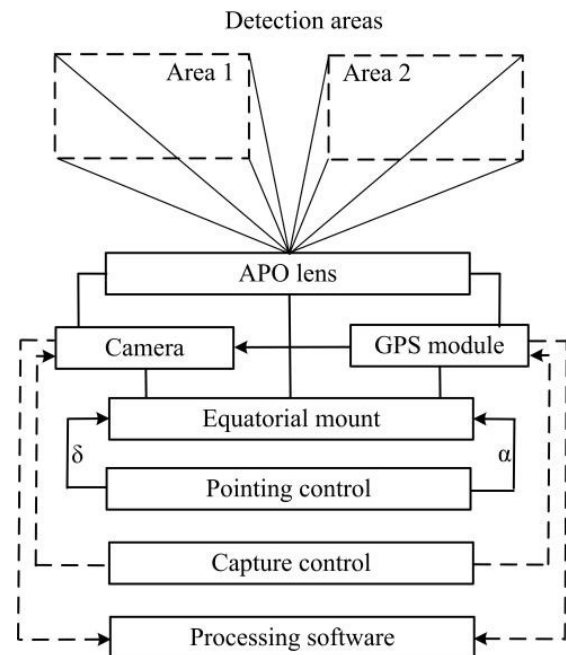


Рисунок 2 – Основные компоненты мобильной оптической системы наблюдения за низкоорбитальными космическими объектами

Figure 2 – Key components of a mobile optical observation system for monitoring low-Earth orbit space objects

Оптическая система включает апохроматический объектив малой апертуры Red-Cat 51 APO с фокусным расстоянием 250 мм и f -числом 4,9, который установлен на компьютеризированном поворотном устройстве экваториального типа (*German Equatorial*) Sky-Watcher EQ6-R PRO с максимальной скоростью движения 4,2 °/с. В качестве оптического датчика используется монохроматическая камера QHY174GPS с эффективной площадью полного кадра 1920*1200 пикселей. В одном из режимов работы данные измерений накапливаются в виде коротких видеозаписей с частотой 30 кадров/с и объёмом порядка 1000 кадров с экспозицией 30 мс и интервалами между захватом кадров 0,1 с.

Общее описание метода определения орбиты с оценкой скорости в плоскости кадра

Для решения задачи начального определения орбиты представленный метод обнаружения

позволяет по угловым измерениям прямого восхождения α_{id} и склонения δ_{id} в двух близко расположенных точках 1-й и 2-й области детектирования неизвестного космического объекта найти два радиус-вектора наклонной дальности ρ_{id} в топоцентрической системе координат пункта наблюдения и затем два радиус-вектора положения $\mathbf{r}_{1d}$ и $\mathbf{r}_{4d}$ в геоцентрической инерциальной системе координат. Геометрическая интерпретация технологии и параметров угловых измерений для 2-х областей обнаружения оптической системой наблюдения представлена на рисунке 3.

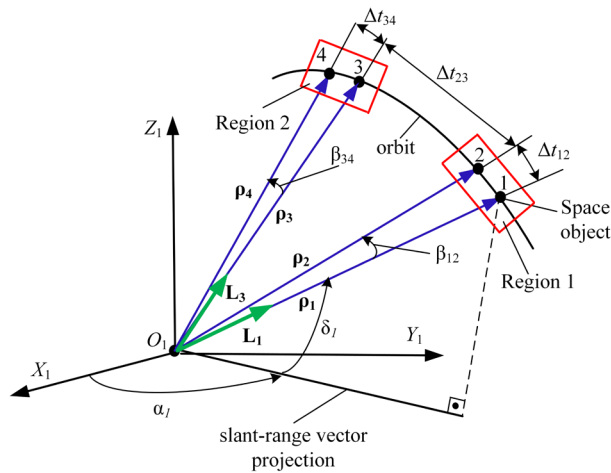


Рисунок 3 – Геометрическая интерпретация технологии и параметров угловых измерений для решения задачи начального определения орбиты космического объекта

Figure 3 – Geometric interpretation of the technology and angular measurement parameters for solving the problem of initial orbit determination of a space object

К исходным данным метода начального определения орбиты неизвестного космического объекта с согласованной оценкой величины скорости в плоскости кадра относятся: начальные орбитальные параметры опорного спутника (спутника-маски) в формате TLE или в виде собственного вектора состояния, необходимые для расчёта модуля вектора наклонной дальности спутника-маски; угловые измерения прямого восхождения α_{im} и склонения δ_{im} спутника-маски в 1-й области детектирования в точках 1 и 2 и 2-й области детектирования в точках 3 и 4 в соответствующие моменты времени; угловые измерения прямого восхождения α_{id} и склонения δ_{id}

детектированного неизвестного космического объекта в 1-й области в точках 1 и 2 и во 2-й области в точках 3 и 4 в соответствующие моменты времени.

На начальном этапе, используя SGP модель движения (для начального вектора состояния в формате TLE из базы данных системы NORAD) или модель возмущённого движения (для начального вектора состояния из собственной базы данных) определяются величина вектора наклонной дальности спутника-маски в топоцентрической системе координат (СК) $OX_1Y_1Z_1$: ρ_{1SGP} в точке 1 из первой области детектирования и ρ_{4SGP} в точке 4 из второй области детектирования. Затем рассчитываются величина вектора скорости в плоскости кадра в первой области $(V_{P12})_m$ и во второй области $(V_{P34})_m$ детектирования, соответственно.

Определение величины вектора скорости в плоскости кадра

Далее представлено определение величины вектора скорости в плоскости кадра для 1-й области детектирования. Используя угловые измерения спутника-маски в точке 1 и 2 первой области в моменты времени t_{1m} , t_{2m} : топоцентрического прямого восхождения α_{1m} , α_{2m} и склонения δ_{1m} , δ_{2m} , находим единичные вектора $\mathbf{L}_{1m}$ и $\mathbf{L}_{2m}$, направленные вдоль векторов наклонной дальности ρ_{1m} и ρ_{2m} в точке 1 и 2:

$$\mathbf{L}_{1m}(\delta_{1m}, \alpha_{1m}) = \begin{pmatrix} \cos \delta_{1m} \cos \alpha_{1m} \\ \cos \delta_{1m} \sin \alpha_{1m} \\ \sin \delta_{1m} \end{pmatrix}; \quad (1)$$

$$\mathbf{L}_{2m}(\delta_{2m}, \alpha_{2m}) = \begin{pmatrix} \cos \delta_{2m} \cos \alpha_{2m} \\ \cos \delta_{2m} \sin \alpha_{2m} \\ \sin \delta_{2m} \end{pmatrix}.$$

В общем случае угловых измерений единичные вектора $\mathbf{L}_1$ и $\mathbf{L}_2$ представляют собой направление на космический объект для точки 1 и точки 2 относительно основной оси наведения оптической системы. Каждая из компонент $\mathbf{L}_1$ и $\mathbf{L}_2$ является проекцией единичного вектора направления в сферической СК (α, δ) на декартовы оси $X_1Y_1Z_1$ топоцентрической системы [3].

Затем определяем угол между векторами наклонной дальности ρ_{1m} и ρ_{2m} спутника-маски в точке 1 и 2:

$$(\beta_{12})_m = \arccos(\mathbf{L}_{1m} \cdot \mathbf{L}_{2m}). \quad (2)$$

Рассчитываем величину вектора скорости в плоскости кадра для первой области $(V_{P12})_m$ детектирования:

$$(V_{P12})_m = \frac{\rho_{ISGP} \cdot (\beta_{12})_m}{(\Delta t_{12})_m}, \quad (3)$$

где $(\Delta t_{12})_m = t_{2m} - t_{1m}$, $(t_{2m} > t_{1m})$ – интервал времени между угловыми измерениями спутника-маски в точке 1 и 2.

Согласно методу обнаружения [12], в коррелируемых областях спутника-маски и неизвестного космического объекта величины вектора скорости в плоскости кадра имеют близкие значения. Тогда, для 1-й области детектирования величина вектора скорости в плоскости кадра неизвестного космического объекта $(V_{P12})_d$ находится через величину вектора скорости в плоскости кадра опорного спутника $(V_{P12})_m$:

$$(V_{P12})_d \approx (V_{P12})_m. \quad (4)$$

Определение радиус-вектора положения

Используя угловые измерения неизвестного космического объекта в точке 1 и 2 первой области детектирования в моменты времени t_{1d} , t_{2d} : топоцентрического прямого восхождения α_{1d} , α_{2d} и склонения δ_{1d} , δ_{2d} , находим аналогично (1) единичные векторы $\mathbf{L}_{1d}(\delta_{1d}, \alpha_{1d})$ и $\mathbf{L}_{2d}(\delta_{2d}, \alpha_{2d})$, направленные вдоль векторов наклонной дальности ρ_{1d} и ρ_{2d} в точке 1 и 2 и определяем угол между векторами наклонной дальности ρ_{1d} и ρ_{2d} , обнаруженного объекта в точке 1 и 2:

$$(\beta_{12})_d = \arccos(\mathbf{L}_{1d} \cdot \mathbf{L}_{2d}), \quad (5)$$

где $(\Delta t_{12})_d = t_{2d} - t_{1d}$; $(t_{2d} > t_{1d})$ – интервал времени между угловыми измерениями неизвестного космического объекта первой области детектирования в точке 1 и 2.

Используя величину вектора скорости в плоскости кадра неизвестного космического объекта $(V_{P12})_d$ и угол между векторами наклонной дальности ρ_{1d} и ρ_{2d} , определяем величину вектора наклонной дальности ρ_{1d} в точке 1 первой области детектирования:

$$\rho_{1d} = \frac{(V_{P12})_d \cdot (\Delta t_{12})_d}{(\beta_{12})_d}. \quad (6)$$

После этого рассчитываем вектор наклонной дальности ρ_{1d} в точке 1, где его компоненты

являются проекциями на декартовы оси $X_1Y_1Z_1$ топоцентрической СК [3]:

$$\rho_{1d} = \rho_{1d} \cdot \mathbf{L}_{1d} = \begin{pmatrix} \rho_{1d} \cos \delta_{1d} \cos \alpha_{1d} \\ \rho_{1d} \cos \delta_{1d} \sin \alpha_{1d} \\ \rho_{1d} \sin \delta_{1d} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Окончательно определяем радиус-вектор положения космического объекта в геоцентрической инерциальной СК $\mathbf{r}_{1d}(x_{1d}, y_{1d}, z_{1d})$ в момент времени t_{1d} :

$$\mathbf{r}_{1d} = \begin{pmatrix} x_{1d} \\ y_{1d} \\ z_{1d} \end{pmatrix} = \rho_{1d} + \mathbf{R}_{1d} = \begin{pmatrix} \rho_{1d} \cos \delta_{1d} \cos \alpha_{1d} \\ \rho_{1d} \cos \delta_{1d} \sin \alpha_{1d} \\ \rho_{1d} \sin \delta_{1d} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} r_\delta \cos(\theta_{LST1}) \\ r_\delta \sin(\theta_{LST1}) \\ r_K \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где $\mathbf{r}_{1d}$ – радиус вектор положения пункта наблюдения (ПН) в момент времени t_{1d} ; θ_{LST1} – местное звездное время ПН на момент t_{1d} ; $r_\delta = (C_E + H) \cos \varphi_{OS}$ и $r_K = (C_E + H) \sin \varphi_{OS}$ – проекции радиус-вектора положения ПН на экваториальную плоскость и ось перпендикулярную этой плоскости; φ_{OS} – широта ПН; $C_E = R_E / \sqrt{1 - e_E^2 \sin^2 \varphi_{OS}}$ – радиус кривизны Земли на меридиане ПН; $e_E = 0,081\,819\,221\,456$ – эксцентриситет Земли; $S_E = C_E(1 - e_E^2)$ – параметр, характеризующий сжатие Земли; H – высота ПН [15, 16].

Аналогично проводим вычисления радиус-вектора положения космического объекта в геоцентрической инерциальной СК $\mathbf{r}_{4d}(x_{4d}, y_{4d}, z_{4d})$ в момент времени t_{4d} .

Определение вектора скорости

Используя метод Гаусса [3], решается задача Ламберта нахождения орбиты детектированного спутника по двум известным радиус-векторам положения $\mathbf{r}_{1d}$ и $\mathbf{r}_{4d}$. По известным координатам радиус-векторов положения космического объекта $\mathbf{r}_{1d}$ и $\mathbf{r}_{4d}$ рассчитывается разность углов истинной аномалии $\Delta \vartheta = \vartheta_4 - \vartheta_1$ в моменты времени t_{1d} и t_{4d} :

$$\Delta \vartheta = \arccos \left[(x_{1d}x_{4d} + y_{1d}y_{4d} + z_{1d}z_{4d}) / (r_{1d}r_{4d}) \right]. \quad (9)$$

Параметр орбиты p определяется через коэффициент η , равный отношению площади сектора орбиты, заключённого между векторами $\mathbf{r}_{1d}$ и $\mathbf{r}_{4d}$, к площади треугольника, образованного этими векторами и хордой [14]:

$$p = \left(\frac{\eta r_0 r_{1d}}{\tau} \right)^2, \quad (10)$$

скорости $(V_p)_d$ на плоскость кадра для интервала между измерениями 0,6 с и 0,1 с в 1-й области обнаружения $(V_{P12})_d$ составила 0,0115 км/с и $-0,0076$ км/с, для 2-й области $(V_{P34})_d - 0,0635$ км/с

и 0,0323 км/с соответственно. На рисунке 5(a–e) показаны блоки разностных кадров опорного спутника и обнаруженного объекта, а также их взаимокорреляционный образ для двух областей.

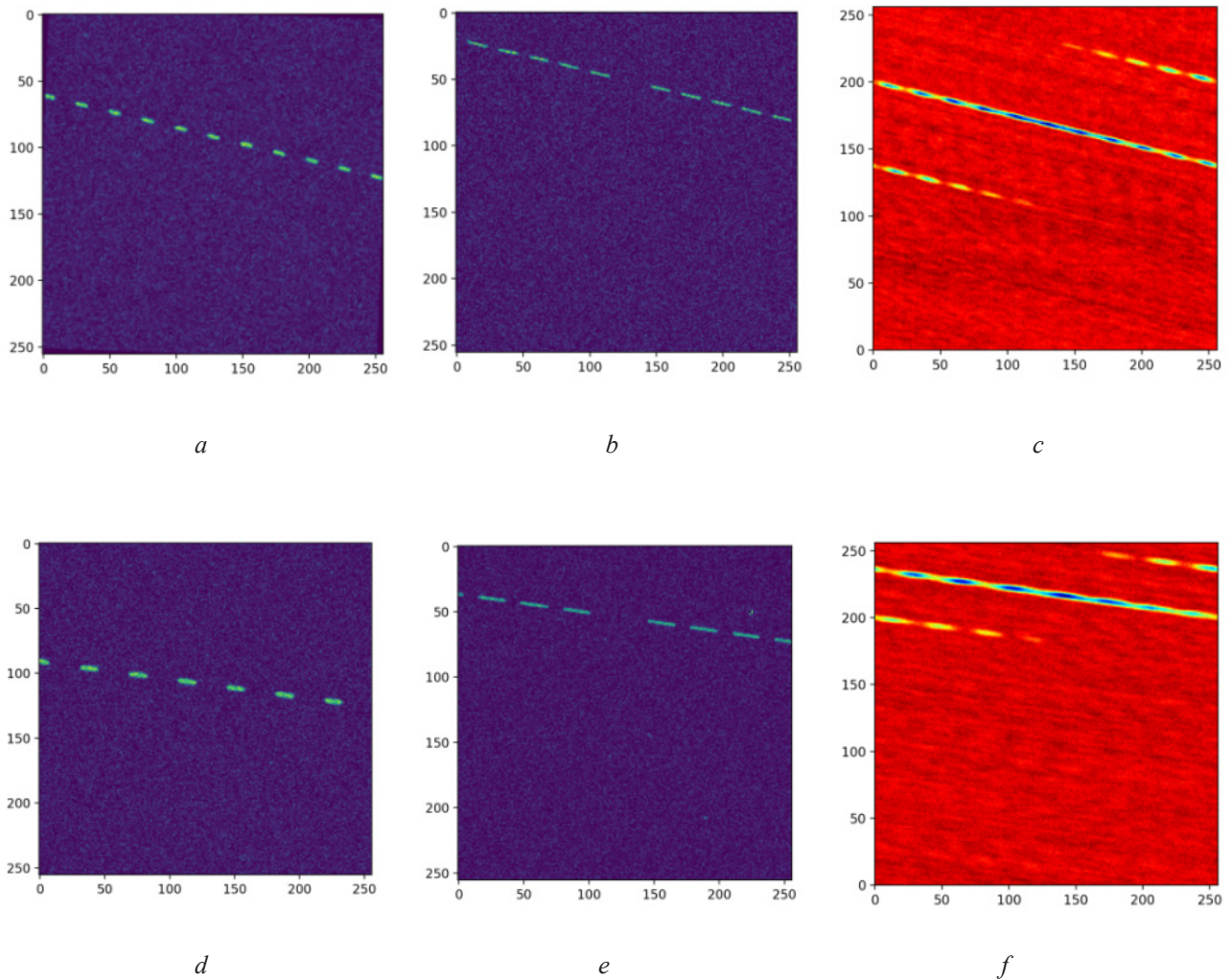


Рисунок 5 – Первая (a, b, c) и вторая (d, e, c) области детектирования ступени ракетносителя SL-12/RB (NORAD: 15772): (a, d) – опорный спутник SEASAT; (b, e) – детектированная ступень ракетносителя SL-12/RB; (c, f) – образ взаимной корреляции опорного и детектированного объекта

Figure 5 – First (a, b, c) and second (d, e, c) detection regions of the rocket stage SL-12/RB (NORAD: 15772): (a, d) – reference satellite SEASAT; (b, e) – detected rocket stage SL-12/RB; (c, f) – cross-correlation pattern of the reference and detected objects

Значения угловых измерений для интервалов 0,1 с и 0,6 с ступени ракетносителя SL-12/RB (NORAD: 15772), а также спутника-маски SEASAT 1 в коррелируемых областях представлены в таблице 1. Проводился анализ влияния интервала между точками измерения в одной и той же области (Δt_{12} и Δt_{34}) обнаружения на значение ошибки при определении

параметров орбиты космического объекта. В таблице 2 представлены ошибки определения радиус-вектора положения, а также вектора скорости ступени ракетносителя SL-12/RB относительно результатов, полученных в модели прогнозирования SGP4, для 1-й и 2-й области обнаружения с интервалами между точками измерения 0,1 и 0,6 с.

Таблица 1 / Table 1

Значения угловых оптических измерений для двух областей обнаружения ступени SL-12/RB.
Дата: 2024/08/25

Angular optical measurement values for the two detection regions of the rocket stage SL-12/RB. Date: 2024/08/25

Интервал 0,6 с / Interval 0.6 s				
Область / Area	Точка / Point	t_m	α_m	δ_m
Спутник маска SEASAT 1, NORAD: 10967 / Reference Satellite SEASAT 1, NORAD: 10967				
1	$i = 1$	23:44: 45.2720	14h32m0.41s	77d06m47.85s
	$i = 2$	23:44: 45.8763	14h32m6.58s	76d54m23.86s
2	$i = 3$	23:43: 42.6246	2h51m35.94s	75d48m11.19s
	$i = 4$	23:43: 43.2289	2h51m43.62s	76d05m53.22s
Детектированная ступень SL-12/RB, NORAD: 15772 / Detected stage SL-12/RB, NORAD: 15772				
1	$i = 1$	22:22:3.3194	13h0m16.92s	81d05m52.44s
	$i = 2$	22:22:3.9237	13h0m0.02s	81d17m19.71s
2	$i = 3$	22:23:17.0460	1h25m21.14s	70d30m13.43s
	$i = 4$	22:23: 16.4417	1h25m25.16s	70d46m15.56s
Интервал 0,1 с / Interval 0.1 s				
Область / Area	Точка / Point	t_m	α_m	δ_m
Спутник маска SEASAT 1, NORAD: 10967 / Reference Satellite SEASAT 1, NORAD: 10967				
1	$i = 1$	23:44:45.2720	14h32m0.41s	77d06m47.85s
	$i = 2$	23:44:45.3728	14h32.m0.86s	77d04m43.19s
2	$i = 3$	23:43:42.6246	2h51m35.94s	75d48m11.19s
	$i = 4$	23:43:42.7253	2h51m43.62s	75d51m13.84s
Детектированный спутник SL-12/RB, NORAD: 15772 / Detected stage SL-12/RB, NORAD: 15772				
1	$i = 1$	22:22:3.3194	13h0m16.92s	81d05m52.44s
	$i = 2$	22:22:3.4201	13h0m15.41s	81d07m48.01s
2	$i = 3$	22:23:17.0460	1h25m21.14s	70d30m13.43s
	$i = 4$	22:23:17.1467	1h25m20.65s	70d27m30.03s

Как видно из таблицы 2, измерения с интервалом 0,6 с показывают абсолютные ошибки компонент радиус-вектора положения в 1-й области обнаружения $(\Delta x_{1d}, \Delta y_{1d}, \Delta z_{1d})_{abs}^{err} = (1,63; 0,47; 2,37)$ км и во 2-й области $(\Delta x_{4d}, \Delta y_{4d}, \Delta z_{4d})_{abs}^{err} = (-0,81; -3,17; -8,05)$ км, соответственно. Это эквивалентно ошибке в величине радиус-вектора положения для 1-й области в 2,91 км, для 2-й области в 8,69 км.

Напротив, если использовать измерения с интервалом в 0,1 с в 1-й и 2-й областях обнаружения, то абсолютные ошибки компонент радиус-вектора положения следующие: в 1-й области $(\Delta x_{1d}, \Delta y_{1d}, \Delta z_{1d})_{abs}^{err} = (2,14; 0,61; -1,02)$ км, во 2-й области $(\Delta x_{4d}, \Delta y_{4d}, \Delta z_{4d})_{abs}^{err} = (3,03; -1,67; 3,58)$ км. Это соответствует уменьшению ошибок в величине радиус-вектора положения до 2,45 км для 1-й области обнаружения и до 4,98 км

для 2-й области. В свою очередь, абсолютная ошибка определения вектора скорости обнаруженной ступени ракетносителя SL-12/RB для угловых измерений с интервалом 0,6 с составила $(\Delta V_{1X}, \Delta V_{1Y}, \Delta V_{1Z})_{abs}^{err} = (0,010; -0,032; 0,066)$ км/с (эквивалентно ошибке в величине скорости

0,220 км/с), что также уступает в точности определения вектора скорости для измерений с интервалом 0,1 с, где абсолютная ошибка составила $(\Delta V_{1X}, \Delta V_{1Y}, \Delta V_{1Z})_{abs}^{err} = (0,010; -0,032; 0,066)$ км/с (что эквивалентно ошибке в величине скорости 0,077 км/с).

Таблица 2 / Table 2

Результат определения радиус-вектора положения и вектора скорости обнаруженной ступени ракетносителя SL-12/RB

Results of determining the position radius vector and velocity vector of the detected rocket stage SL-12/RB

Интервал 0,6 с / Interval 0.6 s			
$\mathbf{r}_{1d} \left(x_{1d}, y_{1d}, z_{1d} \right), \text{ км}$		$\mathbf{r}_{4d} \left(x_{4d}, y_{4d}, z_{4d} \right), \text{ км}$	
(3285.35; -1480.42; 6256.73)		(3747.49, -1304.61, 6020.72)	
$\left(\Delta x_{1d}, \Delta y_{1d}, \Delta z_{1d} \right)_{abs}^{err}, \text{ км}$	$\left(\Delta x_{1d}, \Delta y_{1d}, \Delta z_{1d} \right)_{rel}^{err}, \%$	$\left(\Delta x_{4d}, \Delta y_{4d}, \Delta z_{4d} \right)_{abs}^{err}, \text{ км}$	$\left(\Delta x_{4d}, \Delta y_{4d}, \Delta z_{4d} \right)_{rel}^{err}, \%$
(1.63; 0.47; 2.37)	(0.02; 0.01; 0.03)	(-0.81; -3.17; -8.05)	(0.01; 0.04; 0.11)
$\mathbf{V}_1(V_{1X}, V_{1Y}, V_{1Z}), \text{ км}$		$\left(\Delta V_{1X}, \Delta V_{1Y}, \Delta V_{1Z} \right)_{abs}^{err}, \text{ км}$	
(6.403; 2.329; -2.960)		(-0.035; -0.051; -0.138)	
Интервал 0,1 с / Interval 0.1 s			
$\mathbf{r}_{1d} \left(x_{1d}, y_{1d}, z_{1d} \right), \text{ км}$		$\mathbf{r}_{4d} \left(x_{4d}, y_{4d}, z_{4d} \right), \text{ км}$	
(3285.86; -1480.28; 6253.34)		(3751.96, -1302.86, 6032.01)	
$\left(\Delta x_{1d}, \Delta y_{1d}, \Delta z_{1d} \right)_{abs}^{err}, \text{ км}$	$\left(\Delta x_{1d}, \Delta y_{1d}, \Delta z_{1d} \right)_{rel}^{err}, \%$	$\left(\Delta x_{4d}, \Delta y_{4d}, \Delta z_{4d} \right)_{abs}^{err}, \text{ км}$	$\left(\Delta x_{4d}, \Delta y_{4d}, \Delta z_{4d} \right)_{rel}^{err}, \%$
(2.14; 0.61; -1.02)	(0.03; 0.01; 0.01)	(3.03; -1.67; 3.58)	(0.04; 0.02; 0.05)
$\mathbf{V}_1(V_{1X}, V_{1Y}, V_{1Z}), \text{ км}$		$\left(\Delta V_{1X}, \Delta V_{1Y}, \Delta V_{1Z} \right)_{abs}^{err}, \text{ км}$	
(6.448; 2.348; -2.756)		(0.010; -0.032; 0.066)	

Результаты начального определения орбиты ступени ракетносителя SL-12/RB в виде орбитальных параметров для интерва-

лов измерения 0,1 и 0,6 с, рассчитанные с использованием формул (13)–(15), представлены в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

Орбитальные параметры обнаруженной ступени ракетносителя SL-12/RB

Orbital parameters of the detected rocket stage SL-12/RB

	Интервал, с Interval, s	$a, \text{ км}$	$i, ^\circ$	e	$\Omega, ^\circ$	$u, ^\circ$
IOD	0.6	7216.74	71.371	0.0173	191.568	113.870
	0.1	7147.27	71.133	0.0133	192.117	113.708
Δ_{abs}^{error}	0.6	19.71	0.271	0.0144	-0.632	0.208
	0.1	-49.75	0.033	0.0104	-0.083	0.046
$\Delta_{rel}^{error}, \%$	0.6	0.27	0.38	-	0.33	0.18
	0.1	0.69	0.05	-	0.04	0.04

Как видно из таблицы 3, результаты углового определения наклона орбиты i , долготы восходящего узла Ω и аргумента широты u для интервала измерения в 0,1 с показывают наименьшее значение абсолютных ошибок в сравнении с интервалом 0,6 с. В частности, для интервала 0,1 с абсолютная ошибка в значении наклона составила $0,033^\circ$, долготы восходящего узла – $0,083^\circ$, в значении аргумента широты – $0,046^\circ$, что меньше в соответствующих параметрах на $0,238^\circ$, $0,549^\circ$ и $0,162^\circ$, чем для интервала измерений 0,6 с. Что же касается значения параметра большой полуоси, то для интервала измерения между угловыми координатами в 0,1 с результат определения показывает абсолютную ошибку на 30 км хуже, чем для интервала 0,6 с. Абсолютная ошибка в значении эксцентриситета в зависимости от интервала измерения уменьшается незначительно: для 0,1 с ошибка составила 0,0104, что на 0,004 меньше, чем для интервала 0,6 с.

Заключение

Представлен метод начального определения орбиты неизвестного космического объекта, который позволяет оценить вектор наклонной дальности и однозначно рассчитать параметры орбиты в условиях ограниченного количества данных угловых оптических измерений. Возможность оценки вектора наклонной дальности неизвестного космического объекта по оптическим измерениям обеспечивается разработанным методом обнаружения на основе расчётного значения проекции величины скорости на плоскость кадра опорного спутника с известными орбитальными параметрами. Особенностью реализованного метода начального определения орбиты является использование данных только двух областей обнаружения. В рамках экспериментальных исследований для обнаруженной ступени ракетоносителя SL-12/RB рассчитаны орбитальные параметры и проведён анализ точности их определения от интервала времени между парой угловых измерений в области обнаружения. В каждой области измерены две пары угловых топоцентрических координат – прямого восхождения и склонения на короткой дуге наблюдений, которые соответствовали углу между векторами наклонной дальности $0,04^\circ$

для интервала между измерениями 0,1 с и $0,26^\circ$ для интервала между измерениями 0,6 с. Результаты показали, что предложенный метод позволил определить угловые параметры орбиты ступени SL-12/RB для интервала в 0,1 с между точками измерения одной области обнаружения со следующими абсолютными ошибками: ошибка параметра наклона орбиты i составила $0,033^\circ$, долготы восходящего узла Ω – $0,083^\circ$ и аргумента широты u – $0,046^\circ$. Установлено, что для более короткого интервала между измерениями (0,1 с) ошибки величины радиус-вектора положения, вектора скорости, угловых параметров орбиты (наклона, долготы восходящего узла, аргумента широты) уменьшаются. Абсолютная ошибка в определении значения большой полуоси оказалась меньше на 30 км для интервала между точками измерения в 0,6 с и составила 19,71 км. Полученные результаты мобильной оптической системой обнаружения демонстрируют точность, соизмеримую с показателями начального определения параметров орбит дорогостоящими широкоапертурными оптическими системами, где ошибки в начальном определении большой полуоси и угловых параметров движения обнаруженного космического объекта в среднем меньше 50 км и не хуже $0,5$ град, соответственно. Строгих спецификаций точности в существующих методах начального определения орбит по угловым оптическим измерениям нет возможности установить, поэтому принято оперировать диапазонами ошибок, которые определяются многими факторами, зависящими от аппаратуры, условий, съёмки, условий пролёта и видимости космического объекта. Основным показателем успешных оптических измерений и эффективности метода начального определения орбиты является однозначная идентификация и повторное наблюдение космических объектов в широком диапазоне углов на следующих витках с возможностью получения данных для алгоритмов уточнения орбитальных параметров. Предложенный метод полностью соответствует основным требованиям точности и отличается от существующих тем, что предоставляет возможность безитерационной оценки вектора наклонной дальности в условиях ограниченного количества данных угловых оптических измерений для оперативного

определения орбитальных параметров в режиме близком к реальному времени.

Список использованных источников / References

1. Lei X. [et al.]. Identification of uncatalogued LEO space objects by a ground-based EO array. *Advances in Space Research*. 2021;67(1):350-359. **DOI:** 10.1016/j.asr.2020.07.030.
2. Herrick S. *Astrodynamics: Orbit determination, space navigation, celestial mechanics*. London: Van Nostrand Reinhold Company, 1971. 540 p.
3. Escobar PR. *Methods of Orbit Determination*. Huntington, N.Y.: R.E. Krieger Pub. Co., 1976. 479 p.
4. Vallado D. *Fundamentals of Astrodynamics and Applications*. Hawthorne: Microcosm Press, 2013. 1106 p.
5. Kazemi S. [et al.]. Orbit determination for space situational awareness: A survey. *Acta Astronautica*. 2024;222:272-295. **DOI:** 10.1016/j.actaastro.2024.06.015
6. Gronchi GF, Dimare L. Orbit determination with the two-body integrals. *Celest. Mech. Dyn. Astron.* 2010; 107:299-318. **DOI:** 10.1007/s10569-010-9271-9
7. Milani A, Gronchi GF, Vitturi MDM, Knežević Z. Orbit determination with very short arcs. I admissible regions. 2004;90:57-85. **DOI:** 10.1007/s10569-004-6593-5
8. Lei X. [et al.]. An Improved Range-Searching Initial Orbit-Determination Method and Correlation of Optical Observations for Space Debris. *Appl. Sci.* 2023; 13(24):13224. **DOI:** 10.3390/app132413224
9. Pastor A, Sanjurjo-Rivo M, Escobar D. Initial orbit determination methods for track-to-track association. *Advances in Space Research*. 2021;68(7):2677-2694. **DOI:** 10.1016/j.asr.2021.06.042
10. Cai H. [et al.]. Improved tracklet association for space objects using short-arc optical measurements. *Acta Astronautica*. 2018;151:836-847.
11. Lei X. [et al.]. A geometrical approach to association of space-based very short-arc LEO tracks. *Advances in Space Research*. 2018;62(3):542-553. **DOI:** 10.1016/j.asr.2018.04.044
12. Baranova V, Spiridonov A, Ushakov D, Saetchnikov V. The Resident Space Object Detection Method Based on the Connection between the Fourier Domain Image of the Video Data Difference Frame and the Orbital Velocity Projection J. *Astron. Space Sci.* 2024;41(3):159-170. **DOI:** 10.5140/JASS.2024.41.3.159
13. Baranova VS, Saetchnikov VA, Spiridonov AA. Autonomous Streaming Space Objects Detection Based on a Remote Optical System. *Devices and Methods of Measurements*. 2021;12(4):272-279. **DOI:** 10.21122/2220-9506-2021-12-4-272-279
14. Субботин М. Введение в теоретическую астрономию / М.Ф. Субботин – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1968. 800 с.
14. Subbotin MF. *Introduction to theoretical astronomy*. Moscow, Nauka Publ., 1968. 800 p.
15. Spiridonov AA. [et al.]. Small satellite orbit determination using single pass Doppler measurements. *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*. 2022;3(4):162-170. **DOI:** 10.1109/JMASS.2022.3188736
16. Stoker K. [et al.]. Angles-Only Orbit Determination Accuracies with Limited Observational Arc // *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS)*. 2020. [Electronic resource]. URL: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2020/Poster/Stoker.pdf> (08.04.2025).

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-133-139

Control of Tribological Characteristics of Wear-Resistant AlCrBN Coatings by Nanoscratch Testing

V.A. Lapitskaya^{1,2}, T.A. Kuznetsova^{1,2}, B. Warcholinski³, A.V. Khabarova¹,
T.V. Hamzeleva⁴, A. Gilewicz³, S.A. Chizhik^{1,2}

¹A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus,
P. Brovki str, 15, Minsk 220072, Belarus

²Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

³Koszalin University of Technology,
Sniadeckich, 2, Koszalin 75-453, Poland

⁴O.V. Roman Powder Metallurgy Institute,
Platonov str., 41, Minsk 220005, Belarus

Received 10.02.2025

Accepted for publication 21.04.2025

Abstract

In recent years, high-precision probe methods have been increasingly used to control the surface microstructure, mechanical and tribological properties of coatings instead of standard methods. The aim of the work was to study the tribological characteristics of the wear-resistant coatings (using the example of AlCrBN coatings deposited with changes in nitrogen pressure, substrate bias voltage and cathode current) at the micro- and nanolevel using the nanoscratch testing (nano-scratching) method. The nanoscratch testing method is a non-standard method of tribotesting the wear-resistant coatings and is based on the reciprocating movement of a spherical diamond indenter with a curvature radius of 226 nm on the surface (under a certain load). It was found that the friction coefficient decreases from 0.087 to 0.036 for coatings deposited with an increase in pressure from 2 to 5 Pa. When the bias voltage on the substrate changes from -50 to -150 V, the friction coefficient decreases from 0.077 to 0.041 and when the cathode current changes from 80 to 100 A, the friction coefficient remains virtually unchanged. The use of this method made it possible to perform multi-cycle tribotesting of the AlCrBN coatings, determine the average values of the friction coefficient, and completely eliminate the influence of microparticles (the characteristic defects for coatings deposited by the cathodic arc method) on the measurements. Thus, the effectiveness of the nanoscratch testing (nano-scratching) as a method for the control wear-resistant coatings is demonstrated.

Keywords: coating, microparticles, roughness, coefficient of friction, nanoscratch testing

Адрес для переписки:

Лапцкая В.А.
Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,
ул. П. Бровки, 15, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: vasilinka.92@mail.ru

Address for correspondence:

Lapitskaya V.A.
A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus,
P. Brovki str., 15, Minsk 220072, Belarus
e-mail: vasilinka.92@mail.ru

Для цитирования:

Lapitskaya V.A., Kuznetsova T.A., Warcholinski B., Khabarova A.V.,
Hamzeleva T.V., Gilewicz A., Chizhik S.A.
Control of Tribological Characteristics of Wear-Resistant AlCrBN
Coatings by Nanoscratch Testing.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 2. С. 133–139.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-133-139

For citation:

Lapitskaya V.A., Kuznetsova T.A., Warcholinski B., Khabarova A.V.,
Hamzeleva T.V., Gilewicz A., Chizhik S.A.
Control of Tribological Characteristics of Wear-Resistant AlCrBN
Coatings by Nanoscratch Testing.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(2):133–139.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-133-139

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-133-139

Контроль трибологических характеристик износостойких покрытий AlCrBN методом наноскретчтестирования

В.А. Лапицкая^{1,2}, Т.А. Кузнецова^{1,2}, Б. Вархолински³, А.В. Хабарова¹, Т.В. Гамзелева⁴,
А. Гилевич³, С.А. Чижик^{1,2}

¹Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси,
ул. П. Бровки, 15, г. Минск 220072, Беларусь

²Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

³Кошалинский технологический университет,
ул. Снядецких, 2, г. Кошалин 75-453, Польша

⁴Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа,
ул. Платонова, 41, г. Минск 220005, Беларусь

Поступила 10.02.2025

Принята к печати 21.04.2025

В последние годы всё чаще применяют высокоточные зондовые методы для контроля микроструктуры поверхности, механических и трибологических свойств покрытий вместо стандартных методов. Целью работы было исследование трибологических характеристик износостойких покрытий (на примере покрытий AlCrBN, осаждённых при изменении давления азота, напряжения смещения на подложке и тока катода) на микро- и наноуровне с применением метода наноскретчтестирования (наноцарапания). Метод наноскретчтестирования является нестандартным методом трибоиспытаний износостойких покрытий и основан на возвратно-поступательном движении по поверхности (под определённой нагрузкой) сферического алмазного индентора с радиусом закругления 226 нм. Установлено, что коэффициент трения снижается с 0,087 до 0,036 у покрытий, осаждённых при увеличении давления с 2 до 5 Па. При изменении напряжения смещения на подложке с -50 до -150 В коэффициент трения уменьшается с 0,077 до 0,041, при изменении величины тока катода с 80 до 100 А коэффициент трения практически не меняется. Применение такого метода позволило провести многоцикловое трибоиспытание покрытий AlCrBN, определить средние значения коэффициента трения, а также полностью исключить влияние микрочастиц (характерных дефектов для покрытий, осаждённых катодно-дуговым методом) на измерения. Таким образом показана эффективность наноскретчтестирования (наноцарапания) как метода контроля износостойких покрытий.

Ключевые слова: покрытие, микрочастицы, шероховатость, коэффициент трения, наноскретчтестирование

Адрес для переписки:

Лапицкая В.А.

Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,
ул. П. Бровки, 15, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: vasilinka.92@mail.ru

Address for correspondence:

Lapitskaya V.A.

A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus,
P. Brovki str., 15, Minsk 220072, Belarus
e-mail: vasilinka.92@mail.ru

Для цитирования:

Lapitskaya V.A., Кузнецова Т.А., Warcholinski B., Khabarova A.V.,
Hamzeleva T.V., Gilewicz A., Chizhik S.A.

Control of Tribological Characteristics of Wear-Resistant AlCrBN
Coatings by Nanoscratch Testing.

Приборы и методы измерений.

2025. Т. 16. № 2. С. 133–139.

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-133-139

For citation:

Lapitskaya V.A., Kuznetsova T.A., Warcholinski B., Khabarova A.V.,
Hamzeleva T.V., Gilewicz A., Chizhik S.A.

Control of Tribological Characteristics of Wear-Resistant AlCrBN
Coatings by Nanoscratch Testing.

Devices and Methods of Measurements.

2025;16(2):133–139.

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-133-139

Introduction

On the surface of nitride coatings deposited by cathodic arc evaporation method, there is a microdroplet phase (or microparticles ranging in size from the hundreds of nanometers to several micrometers [1–3]. In some works, such structural units are considered coating defects, which can act as concentrators of internal stresses in the coating volume and disrupt its the structural integrity [4]. In other studies, the microparticles can contribute to the formation of a surface modified layer during the friction tests [3]. It should be noted that the attachment of such the microdroplets to the coatings surface is unstable and under the mechanical loads they usually break away from the surface, leaving behind defects in the form of craters and holes. This can also negatively affect the quality and properties of the coatings during operation.

The tribological characteristics of the wear-resistant coatings are usually determined using macro tests on tibomachines using the steel balls with a diameter of the several mm [5–7]. In this case, the tests lead to the deformation and unsuitability of the coating for further use. Such tests participate the microparticles, which can either improve or worsen the tribological properties. To reduce the amount of microparticles on the surface, this is achieved by changing the technological parameters of deposition [8]. Or it is possible to use methods that allow testing on the surface completely eliminating the microparticles. Such methods include the nanoscratch testing method [9–11]. This method eliminates the influence of the microparticles, minimizes the deformation area during tribotesting and allows obtaining results much faster compared to macrotesting due to high contact stresses.

The aim of the work was to demonstrate the efficiency of control the tribological characteristics of the wear-resistant coatings (using the AlCrBN coating as an example) at the micro- and nanolevel using the nanoscratch testing method.

Materials and research methods

The tribological characteristics were tested using nanoscratch testing on the wear-resistant AlCrBN coatings. The AlCrBN coatings with a thickness of $4.4 \pm 0.1 \mu\text{m}$ were deposited using the cathodic arc evaporation method in a TINA 900 M setup [12]. The $\text{Al}_{50}\text{Cr}_{30}\text{B}_{20}$ alloy cathodes were used. The martensitic stainless steel 4H13 (X39Cr13 – DIN standard)

was used as a substrate. The substrates 28 mm and 32 mm in diameter and 3 mm thick were polished to a roughness of $R_a 0.02 \mu\text{m}$. The deposition temperature of AlCrBN coatings 350°C . A detailed description of the deposition of the coatings is given in [12]. In this work, studies were carried out on coatings obtained with the parameters given in Table 1.

Table 1

Deposition parameters of the AlCrBN coatings

Sample	Nitrogen pressure p_{N_2} , Pa	Substrate bias voltage U_B , V	Arc current I_C , A
1	2 Pa	-100 V	80 A
2	5 Pa	-50 V	80 A
3	4 Pa	-150 V	80 A
4	4 Pa	-100 V	80 A
5	4 Pa	-100 V	100 A
6			

The coating morphology was analyzed using scanning electron microscopy (SEM, LV 5500, JEOL). The SurfTest SJ-210 contact profilometer (Mitutoyo, Japan) was used to determine the surface microroughness and the depth of the wear tracks. Three profiles of 2.5 mm long were evaluated on each coating to determine roughness parameters (R_a , R_q , R_z).

The surface morphology and nanoroughness were studied using a Dimension FastScan (Bruker, USA) atomic force microscope (AFM) in the Peak-Force QNM (Quantitative Nanoscale Mechanical Mapping) mode. The standard NSC-11 silicon cantilevers (MikroMasch, Estonia) with a cantilever stiffness of 3 N/m and a tip radius of 10 nm were used.

The microtribological properties were determined using a Hysitron 750Ubi (Bruker, USA) nanoindenter with a two-dimensional transducer for nanoscratch testing [11]. A diamond conical indenter with a radius of curvature of 226 nm and an angle of 60° at the apex was used. The load function and the scratches length during testing were set [11]. The tests were carried out in the multi-cycle tests – 100 cycles with a total length of 500 μm and a time of 500 s (1 cycle in 5 s). Load was the 500 μN . The scratch length was 5 μm . The average value of the friction coefficient with standard deviation was determined for 100 cycles. Tribological tests were carried out with reciprocating motion of the indenter.

Results and discussion

According to the SEM study, a large number of microdroplets are present on the surface of the coatings deposited according to the parameters from Table 1 (Figure 1, yellow arrows). Changing the de-

position parameters (increasing the pressure from 2 to 5 Pa, the bias voltage on the substrate from -50 to -150 V and the cathode current from 80 to 100 A) leads to a decrease in the number of microdroplets on the surface (Figure 1, *b, d, f*).

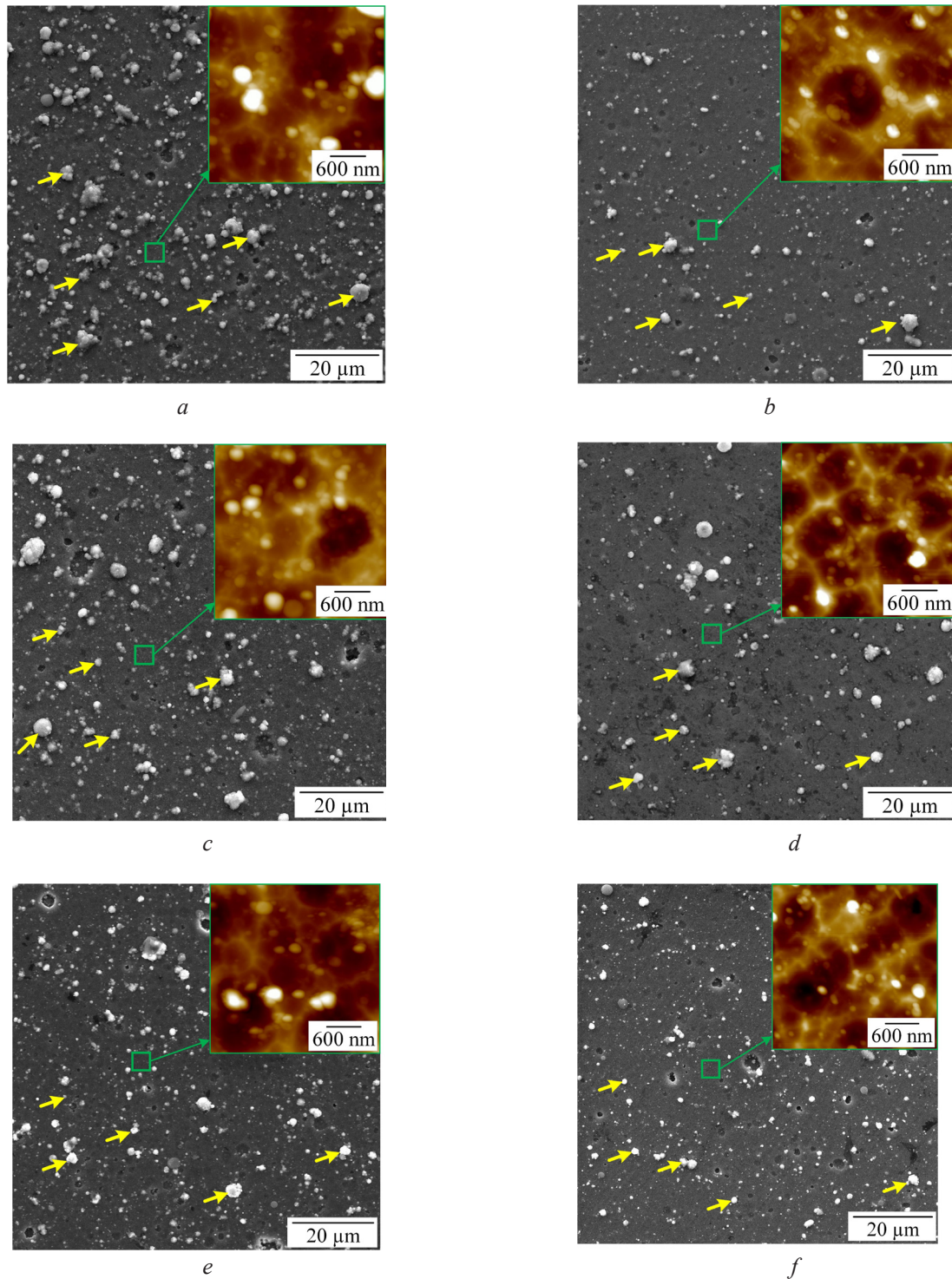


Figure 1 – Scanning electron microscope images (insets – atomic force microscope images, $3 \times 3 \mu\text{m}^2$) of the surfaces of the AlCrBN coating applied at different parameters: at 2 Pa, 80 A, -100 V (*a*); at 5 Pa, 80 A, -100 V (*b*); at 4 Pa, 80 A, -50 V (*c*); at 4 Pa, 80 A, -150 V (*d*); at 4 Pa, 80 A, -100 V (*e*); at 4 Pa, 100 A, -100 V (*f*)

For the nanoscratch testing, an area of the several micrometers is sufficient. Therefore, we select the areas on the coating surface within which there are no the microparticles (Figure 1, green squares). The surface structure for testing is shown in the insets (AFM images) in Figure 1.

The presence of microparticles on the surface significantly increases the coatings roughness (Table 2), which in turn affects the tribological character-

istics of the coatings. Microroughness measured with an atomic force microscope is significantly reduced in areas without the microparticles (Table 3).

As a result of applying nanoscratch testing on the coatings surface without the microparticles, the dependences of the friction coefficient on the cycles number were obtained (Figure 2). Based on the obtained dependences, the average friction coefficient for the each coating was determined (Table 4).

Table 2

Surface roughness (from a profilometer) of the AlCrBN coatings

Constant parameters	Changing parameters	R_a , μm	R_q , μm	R_z , μm
-100 V, 80 A	2 Pa	0.361 ± 0.044	0.500 ± 0.090	2.496 ± 0.605
	5 Pa	0.236 ± 0.018	0.325 ± 0.039	1.710 ± 0.264
4 Pa, 80 A	-50 V	0.211 ± 0.014	0.275 ± 0.022	1.432 ± 0.147
	-150 V	0.212 ± 0.013	0.281 ± 0.022	1.494 ± 0.150
4 Pa, -100 V	80 A	0.237 ± 0.013	0.323 ± 0.019	1.683 ± 0.074
	100 A	0.189 ± 0.011	0.259 ± 0.019	1.385 ± 0.106

Table 3

Surface microroughness (from an atomic force microscope, on $3 \times 3 \mu\text{m}^2$) of the AlCrBN coatings

Constant parameters	Changing parameters	R_a , μm	R_q , μm	R_z , μm
-100 V, 80 A	2 Pa	33.0 ± 1.7	48.9 ± 2.4	219.0 ± 11.0
	5 Pa	21.3 ± 1.1	27.5 ± 1.4	45.4 ± 2.3
4 Pa, 80 A	-50 V	30.3 ± 1.5	41.8 ± 2.1	98.7 ± 4.9
	-150 V	16.9 ± 0.8	21.0 ± 1.1	76.4 ± 3.8
4 Pa, -100 V	80 A	29.0 ± 1.5	38.2 ± 1.9	100.0 ± 5.0
	100 A	14.8 ± 0.7	19.0 ± 1.0	59.8 ± 3.0

Table 4

Tribological properties of AlCrBN coatings by nano-scratch testing and macro testing methods

Constant parameters	Changing parameters	$\text{CoF}_{\text{micro}}$	$\text{CoF}_{\text{macro}}$ [12]
-100 V, 80 A	2 Pa	0.087 ± 0.006	0.67 ± 0.02
	5 Pa	0.036 ± 0.004	0.66 ± 0.02
4 Pa, 80 A	-50 V	0.077 ± 0.018	0.65 ± 0.02
	-150 V	0.041 ± 0.003	0.77 ± 0.01
4 Pa, -100 V	80 A	0.047 ± 0.007	0.70 ± 0.01
	100 A	0.045 ± 0.003	0.72 ± 0.02

The friction coefficient values are an order of magnitude lower than after macrotests (Table 4). The correlation of the friction coefficient after the nanoscratch testing with macrotests is present only for coatings deposited at different pressures – the friction coefficient decreases from 0.087 to 0.036. When the substrate bias voltage changes from -50 to -150 V, the friction coefficient decreases from 0.077 to 0.041. The friction coefficient remains virtually unchanged for coatings when the cathode current changes. Such friction coefficient values are

primarily related to the contact area during testing [11]. In macrotests, the microparticles participate in friction in addition to the main coating.

Also, to determine the average friction coefficient, the values for the first 10 cycles were not taken into account, since these cycles are significantly affected by the surface topography (even without microdroplets on the surface, there is a certain surface unevenness). The AFM images (Figure 1) show a cellular structure, which forms the microrelief of the surface on which the nanoscratch testing was carried out.

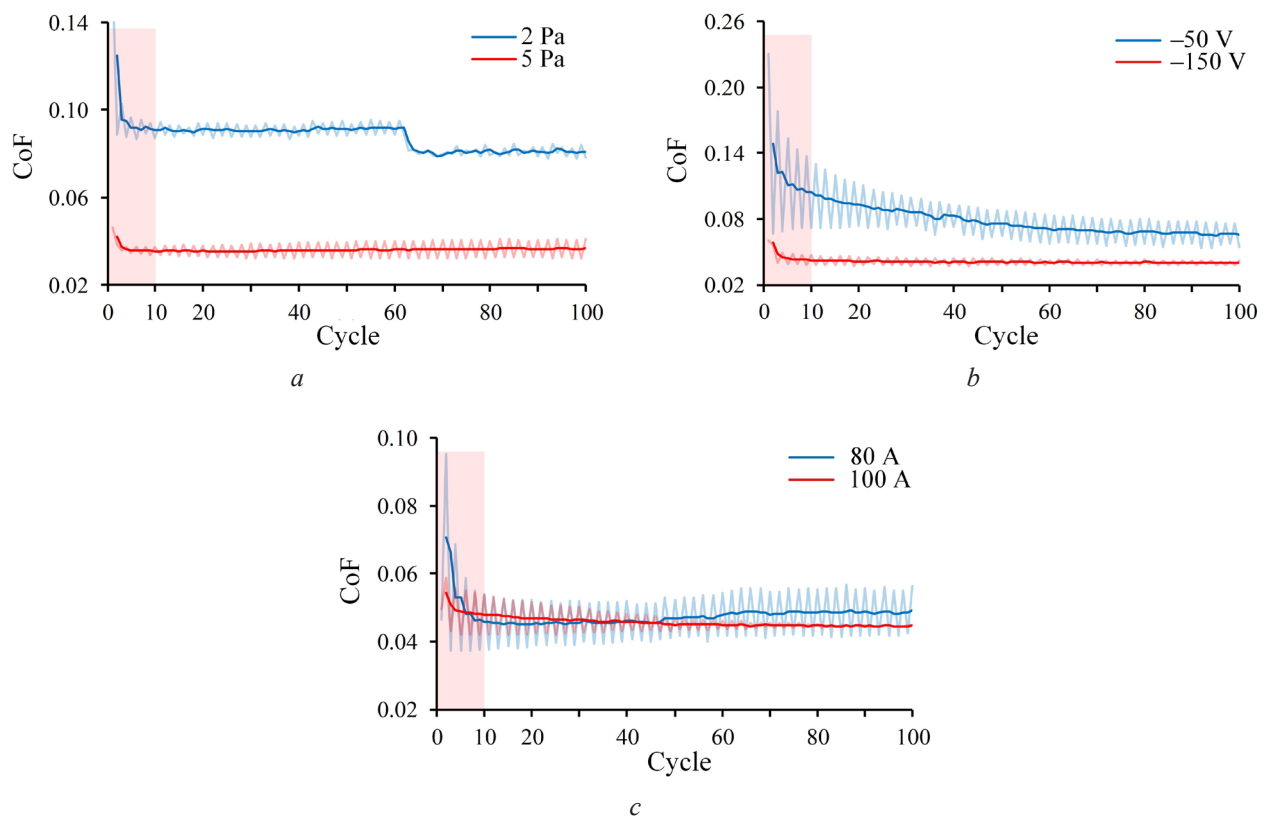


Figure 2 – Dependences of the friction coefficient on the cycles number for AlCrBN coatings applied at different parameters: at 2 and 5 Pa (a); at -50 and -150 V (b); at 80 and 100 A (c)

The zigzag curve on each plot in Figure 2 shows the reciprocating test pattern – the forward and reverse stroke of the diamond spherical indenter.

Conclusion

The tribological characteristics of the wear-resistant AlCrBN coatings deposited by the cathodic arc evaporation method have been studied. The coatings were deposited with changing nitrogen pressure, substrate bias voltage, and cathode current.

Tribological tests were carried out at the micro- and nanolevel using the nanoscratch testing method. It was found that the friction coefficient decreases from 0.087 to 0.036 for coatings deposited with an increase in pressure from 2 to 5 Pa. When the substrate bias voltage changes from -50 to -150 V, the friction coefficient decreases from 0.077 to 0.041, and when the cathode current changes from 80 to 100 A, the friction coefficient remains virtually unchanged. The use of the nanoscratch testing method made it possible to exclude the influence

of microparticles on the measurements of tribological characteristics. A comparison of the friction coefficient determined by the macrotribotest and nanoscratch testing was carried out. The efficiency of the nanoscratch testing as a method for control the wear-resistant coatings is demonstrated.

Acknowledgments

This research was supported by the grant of Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research BRFFR No. T21MS-029. Publication partly financed by the National Centre for Research and Development, Poland, BIOSTRATEG3/344303/14/NCBR/2018.

References

1. Tritremmel C, Daniel R, Lechthaler M, Rudigier H, Polcik P, Mitterer C. Microstructure and mechanical properties of nanocrystalline Al-Cr-B-N thin films. *Surf. Coat. Technol.* 2012;213:1–7. **DOI:** 10.1016/j.surfcoat.2012.09.055
2. Kumar S, Maity SR, Patnaik L. Friction and tribological behavior of bare nitrided, TiAlN and AlCrN coated MDC-K hot work tool steel. *Ceram. Int.* 2020;(46):17280–17294. **DOI:** 10.1016/j.ceramint.2020.04.015
3. Kuznetsova T. [et al.]. Effect of metallic or non-metallic element addition on surface topography and mechanical properties of CrN coatings. *MDPI Nanomaterials.* 2020;(10):2361. **DOI:** 10.3390/nano10122361
4. Alexey Vereschaka, Filipp Milovich, Nikolay Andreev, Catherine Sotova, Islam Alexandrov, Alexander Muranov, Maxim Mikhailov, Aslan Tatarkanov. Investigation of the structure and phase composition of the microdroplets formed during the deposition of PVD coatings. *Surface & Coatings Technology.* 2022;(441):128574 **DOI:** 10.1016/j.surfcoat.2022.128574
5. Yin-Yu Chang, Chung-En Chang Mechanical properties and tribological performance of multilayered AlCrBN/AlTiBN coatings *Surface and Coatings Technology.* 2025;(496):131691.
6. Yin-Yu Chang, Cheng-Hsi Chung, Zong-Hong Tsai, Jun-Ming Tsai Tribological and mechanical properties of AlCrBN hard coating deposited using cathodic arc evaporation *Surface and Coatings Technology.* 2022;(432):128097.
7. Tritremmel C, Daniel R, Rudigier H, Polcik P, Mitterer C. Mechanical and tribological properties of Al-Ti-N/Al-Cr-B-N multilayer films synthesized by cathodic arc evaporation *Surface and Coatings Technology.* 2014;(246):57–63.
8. Grigoriev S. [et al.]. Specific features of the structure and properties of arc-PVD coatings depending on the spatial arrangement of the sample in the chamber. *Vacuum.* 2022;(200):111047. **DOI:** 10.1016/j.vacuum.2022.111047
9. Sheikh Haris Mukhtar, Wani MF, Rakesh Sehgal, Sharma MD. 108017 Nano-mechanical and nano-tribological characterisation of self-lubricating MoS₂ nanostructured coating for space applications. *Tribology International.* 2023;(178): Part A.
10. Behzad Sadeghi, Pasquale Cavaliere, Ali Shabani, Catalin Iulian Pruncu and Luciano Lamberti. Nano-scale wear: A critical review on its measuring methods and parameters affecting nano-tribology. *Proc IMechE Part J: J Engineering Tribology* 1–31 IMechE 2023. **DOI:** 10.1177/13506501231207525
11. Kuznetsova T. [et al.]. Features of wear of DLC-Si coating under microcontact conditions during the formation of secondary structures, *Compos. Struct.* 2023;(316):117039. **DOI:** 10.1016/J.COMPSTRUCT.2023.117039
12. Warcholinski B, Gilewicz A, Myslinski P, Dobruchowska E, Murzynski D, Kochmanski P, Rokosz K, Raaen S. Effect of nitrogen pressure and substrate bias voltage on the properties of Al–Cr–B–N coatings deposited using cathodic arc evaporation, *Tribol. Int.* 2021;(154):106744. **DOI:** 10.1016/j.triboint.2020.106744

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-140-146

Monte Carlo Simulation of Photoresponse in Silicon Photodiodes with p - n -Junction and p - i - n -Structure

A.V. Borzdov¹, V.M. Borzdov¹, D.N. Buinouski¹, A.N. Petlitsky²

¹Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus

²JSC “Integral” – «Integral» Holding Management Company,
Kazintsa str., 121A, Minsk 220108, Belarus

Received 17.02.2025

Accepted for publication 23.04.2025

Abstract

Numerical modeling of semiconductor photodiodes' electrical characteristics is an important task at the stage of their development and design. In this regard, it should be noted that one of the most promising methods that can be used for this purpose is the ensemble Monte Carlo method, which allows including, along with the dominant mechanisms of charge carriers' scattering in the device structure, also the processes of impact ionization, which is very important for adequate modeling of a wide class of silicon photodiodes operating in the reverse bias mode. The aim of the work was to study the influence of the impact ionization process on the electrical characteristics of silicon photodiodes with a p - n -junction and a p - i - n -structure operating in the reverse bias mode under the influence of picosecond pulses of visible radiation. Using self-consistent simulation by the ensemble Monte Carlo method, the electron ionization coefficient in bulk silicon at a crystal lattice temperature of 300 K was calculated and compared with known experimental data. Photoresponse in silicon submicron photodiodes with a p - n -junction and photodiodes with a p - i - n -structure was calculated for different thicknesses of the undoped i -region. It was shown that use of simple models similar to the Keldysh model with constant values of the threshold energy and other parameters for calculating the rate of the impact ionization process did not allow obtaining values of the ionization coefficient matched with experimental data in a wide range of electric field strengths. This result raises the question on the adequacy of the device structures' electrical characteristics modeling with a non-uniform electric field when using such simple impact ionization models.

Keywords: Monte Carlo method, photocurrent, silicon photodiode, impact ionization

Адрес для переписки:

Борздов В.М.
Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: borzdov@bsu.by

Address for correspondence:

Borzdov V.M.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: borzdov@bsu.by

Для цитирования:

A.V. Borzdov, V.M. Borzdov, D.N. Buinouski, A.N. Petlitsky.
Monte Carlo Simulation of Photoresponse in Silicon Photodiodes
with p - n -Junction and p - i - n -Structure.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 2. С. 140–146.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-140-146

For citation:

Borzdov AV, Borzdov VM, Buinouski DN, Petlitsky AN.
Monte Carlo Simulation of Photoresponse in Silicon Photodiodes
with p - n -Junction and p - i - n -Structure.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(2):140–146.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-140-146

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-140-146

Моделирование методом Монте-Карло фотоотклика в кремниевых фотодиодах с p - n -переходом и p - i - n -структурой

А.В. Борздов¹, В.М. Борздов¹, Д.Н. Буйновский¹, А.Н. Петлицкий²

¹Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь

²ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл»,
ул. Казинца, 121А, г. Минск 220108, Беларусь

Поступила 17.02.2025

Принята к печати 23.04.2025

Численное моделирование электрических характеристик полупроводниковых фотодиодов является важным этапом на стадии их разработки и проектирования. В этой связи следует отметить, что одним из наиболее перспективных методов, который может быть использован для этой цели, является многочастичный метод Монте-Карло. Данный метод позволяет учитывать и включать наряду с доминирующими механизмами рассеяния носителей заряда в приборной структуре также и процессы ударной ионизации, что является очень важным при адекватном моделировании широкого класса кремниевых фотодиодов, работающих в режиме обратного смещения. Целью работы явилось изучение влияния процесса ударной ионизации на электрические характеристики кремниевых субмикронных фотодиодов с p - n -переходом и p - i - n -структурой, работающих в режиме обратного смещения при воздействии пикосекундных импульсов излучения видимого диапазона спектра. С помощью самосогласованного моделирования многочастичным методом Монте-Карло проведен расчёт и сравнение с известными экспериментальными данными коэффициента ионизации электронами в объёмном кремнии при температуре кристаллической решётки 300 К. Рассчитан фотоотклик в кремниевых субмикронных фотодиодах с p - n -переходом и фотодиодах с p - i - n -структурой для различных толщин i -области. Показано, что использование для расчёта интенсивности процесса ударной ионизации простых моделей, подобных модели Келдыша, предполагающих постоянные значения пороговой энергии и других параметров, не позволяет согласовать полученные значения коэффициента ионизации с экспериментальными данными в широком диапазоне напряжённости электрического поля. Этот результат ставит вопрос об адекватности моделирования электрических характеристик приборных структур с неоднородным электрическим полем при использовании таких простых моделей ударной ионизации.

Ключевые слова: метод Монте-Карло, фототок, кремниевый фотодиод, ударная ионизация

Адрес для переписки:

Борздов В.М.
Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: borzdov@bsu.by

Address for correspondence:

Borzdov V.M.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: borzdov@bsu.by

Для цитирования:

A.V. Borzdov, V.M. Borzdov, D.N. Buinowski, A.N. Petlitsky.
Monte Carlo Simulation of Photoresponse in Silicon Photodiodes
with p - n -Junction and p - i - n -Structure.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 2. С. 140–146.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-140-146

For citation:

Borzdov A.V., Borzdov V.M., Buinowski D.N., Petlitsky A.N.
Monte Carlo Simulation of Photoresponse in Silicon Photodiodes
with p - n -Junction and p - i - n -Structure.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(2):140–146.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-140-146

Introduction

It is well known that silicon photodiode structures are widely used in optoelectronics as converters of optical radiation into electrical signals. Semiconductor photodiodes, in particular silicon ones, are the main elements for creating detectors of visible and infrared spectral range radiation. Such photodiodes can operate both in the usual current mode and in the mode of counting single photons [1–4]. The relevance of the study and modeling of the operation of silicon photodiodes of various constructions is due, in particular, to the significant development of silicon technology and the widespread use of silicon in modern microelectronics. Due to this, it is possible to integrate silicon photodiode structures into various microelectronic systems within the framework of existing and promising technological processes used in the production of integrated circuits.

During the process of development and design of modern semiconductor photodiodes and other integrated microelectronics devices, an important task, without which any production cannot do, is numerical computer modeling. The purpose of such modeling is to predict the electrical characteristics of devices in various operating modes. On the other hand, computer modeling allows us to give recommendations on optimizing the design and topological parameters of devices based on numerical calculations of their electrical characteristics. For computer modeling of integrated submicron photodiodes and phototransistors, one of the most promising methods is numerical self-consistent simulation based on the ensemble Monte Carlo method [5–9]. The ensemble Monte Carlo method, as a method of kinetic simulation, allows us to simulate the processes of charge carrier transport in semiconductor device structures. The simulation is able to take into account the main, most significant, processes of charge carrier scattering, as well as the processes of their generation-recombination. In the case of diodes with a p - n -junction and p - i - n -structure operating in reverse bias mode, it is especially important to take into account the processes of avalanche multiplication of charge carriers due to interband impact ionization [10–12].

The aim of this work was to numerically simulate, using the ensemble Monte Carlo method, the dependence of current density on time in submicron silicon photodiodes with a p - n -junction and a p - i - n -structure operating in the reverse bias mode under the influence of picosecond pulses of visible spectrum radiation, and taking into account the processes of impact ionization of charge carriers.

Photodiode model

The two-dimensional simulation regions of silicon photodiodes with a p - i - n -structure considered in this work are schematically shown in Figure 1. For diodes with a p - n -junction, the difference from the structure shown in Figure 1 is the absence of an intrinsic undoped i -Si layer. It is assumed that the radiation is directed perpendicular to the interface between the silicon and the external environment, and penetrates only into the region located between the electrodes of the photodiode. The length of the region is $L_C = 0.25 \mu\text{m}$. Thickness of the photodiode into substrate is $W_S = 0.5 \mu\text{m}$. For the doped n - and p -layers of Si the doping levels are supposed equal. Concentrations of the donor and acceptor impurities in the layers are 10^{24} m^{-3} , respectively. The diodes with different thicknesses of the doped Si layers are regarded as follows: $W_{d1} = W_{d2} = 250 \text{ nm}$ (diode with a p - n -junction), 225 nm, 200 nm and 150 nm (diodes with a p - i - n -structure and the thickness of the i -layer equal to 50 nm, 100 nm and 200 nm, respectively). The lattice temperature for the simulation is supposed to be 300 K.

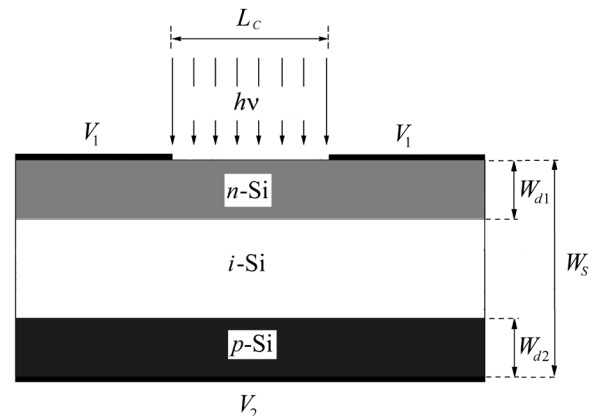


Figure 1 – Schematic cross-section of a photodiode with p - i - n -structure

The calculation of the electrical characteristics of considered diode structures is carried out by the ensemble Monte Carlo method within the framework of self-consistent two-dimensional simulation based on the particle method. The description and basics of this method can be found, for example, in the monographs [5, 6]. When carrying out the calculations, we consider the effect of radiation in the visible range of the spectrum with the following characteristics: the radiation wavelength is equal to 650 nm, the intensity of the radiation is $5 \cdot 10^{10} \text{ W/m}^2$, the radiation pulse duration is 1 ps. As a model approximation,

we also assume that the intensity of the radiation pulses is constant during the exposure time and is uniformly distributed over the surface area of the diode structure.

The processes of electron and hole transport in the considered photodiodes are generally simulated in the same way as in silicon MOS transistors [13, 14]. When simulating the processes of electron transport in the conduction band of silicon, the population of the X and L valleys of the semiconductor is taken into account. The analytical dispersion law for electrons in both valleys assumes a non-parabolicity coefficient of 0.5 eV^{-1} . To simulate the processes of hole transport in the valence band of silicon, an analytical dispersion law is also used, which takes into account nonparabolicity and anisotropy, and is considered in the band of heavy and light holes, as well as in the split-off band due to spin-orbit interaction. The Monte Carlo simulation procedure includes the processes of electron scattering on acoustic and optical phonons, on plasmons, on ionized impurity, as well as the process of interband impact ionization initiated by electrons. For holes, the simulation includes processes of scattering on phonons and ionized impurity, as well as the process of interband impact ionization initiated by holes. The simulation procedure also includes processes of optical generation of electron-hole pairs during intrinsic absorption of the radiation. The numerical model takes into account reflection processes of optical radiation from the interfaces of materials.

The process of impact ionization by electrons and holes in the Monte Carlo simulation procedure is considered as an additional scattering mechanism, in which electron-hole pairs are generated. When simulating the processes of charge carrier transport in semiconductor device structures by the Monte Carlo method, the Keldysh model and similar models are often used to describe the impact ionization scattering rate for both electrons and holes. In the case of the Keldysh model, the expression for the rate of the impact ionization process in general can be presented in the following form [10, 13]:

$$W_{\text{II}}(E) = A_{\text{II}} \left(\frac{E - E_{\text{th}}}{E_{\text{th}}} \right)^b, \quad (1)$$

where A_{II} and b are some constants; E is the electron kinetic energy; E_{th} is the so called threshold energy of impact ionization. Along with formula (1), in some works devoted to the numerical calculation of the scattering rate of the impact ionization

process by electrons and holes taking into account the full band structure of silicon, an interpolation formula of the form [11, 14, 15] is used for its calculation:

$$W_{\text{II}}(E) = C_{\text{II}} (E - E_{\text{th}})^b, \quad (2)$$

where the parameters C_{II} and b , as in formula (1), are constants. Formula (2) in principle corresponds to formula (1), reduced to the appropriate form.

Formulas (1) and (2) have become widespread due to their relative simplicity. The rate of the impact ionization process, specified by these formulas, is a function of only the energy of the charge carrier E , which makes it very convenient for use in simulating transport processes by the Monte Carlo method. The parameters A_{II} , C_{II} , b and E_{th} are considered as some constant values. For both formula (1) and formula (2), different values of the specified parameters are found in the literature. So, for the Keldysh model (1) in [13] it was proposed to define the parameters as follows: $A_{\text{II}} = PW_{\text{ph}}(E_{\text{th}})$, where P is the constant; $W_{\text{ph}}(E_{\text{th}})$ is the total electron scattering rate on phonons for the electron energy equal to E_{th} . According to the theoretical estimate given in [13], the threshold energy E_{th} and constant P take the following values: $E_{\text{th}} = 1.2 \text{ eV}$ and $P = 0.38$ for the so called "soft" threshold, and $E_{\text{th}} = 1.8 \text{ eV}$ and $P = 100$ for so called "hard" threshold. Constant b is equal to 2 in both cases. For formula (2), taking into account the effects associated with the real band structure of silicon gives values of the coefficient b greater than 2. So, for example, according to [11], the value of C_{II} is equal numerically to $9.5 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1} \text{ eV}^{-4.79}$, $b = 4.79$, and the value of E_{th} , given in electron-volts, is equal to 1.1 eV. Somewhat different values of these parameters are present in [14]. It can be assumed that these values depend on the approximate description of the semiconductor band structure used and are determined by matching the simulation results with the experimental data, taking into account the values of any parameters or characteristics of the structure under study, for example, the avalanche multiplication factor, the current-voltage characteristics of the p - n -junction, etc. As was shown in [16], the results of simulation of the current-voltage characteristics of silicon submicron MOS transistors taking into account the impact ionization process in accordance with different models and parameters from [13, 14] have significant differences. Thus, in the general case, the parameters A_{II} , C_{II} , b and E_{th} can be considered as fitting parameters.

In this paper, we study the effect of the electron impact ionization process on the photocurrent response in the photodiode structure shown in Figure 1. In this case, formula (2) is used to calculate the scattering rate of electron impact ionization. For definiteness, we will assume the constant values of the exponent $b = 4.79$ and the threshold energy $E_{th} = 1.1$ eV, taken from [11]. The constant C_{II} is considered to be a fitting parameter, and its value can be determined from the results of simulating the electron ionization coefficient α using the ensemble Monte Carlo method in such a way that the value of α , calculated using the Monte Carlo method with a given accuracy, agrees with the known experimental results. Taking into account the fact that the available literature data on the experimental determination of the dependence of the electron ionization coefficient on electric field strength differ somewhat [17–20], for definiteness, we use the interpolation of the experimental data from [17] as a basis.

For the calculation of the hole impact ionization scattering rate in all cases we will use the formula (2) with the following parameter values from [15]: $C_{II} = 1.4 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1} \text{ eV}^{-3.4}$, $b = 3.4$, and $E_{th} = 1.49$ eV.

The results of calculations

Figure 2 shows the experimental dependence of the electron impact ionization coefficient in bulk silicon α on the electric field strength F for a crystal lattice temperature of 300 K, taken from [17] (solid curve). The range of electric field strength variation is from $1.25 \cdot 10^7$ to 10^8 V/m. The presented experimental dependence of the electron ionization coefficient corresponds to bulk silicon. The electric field strength vector is directed along the main crystallographic direction $\langle 100 \rangle$. It should be noted that the dependences of the electron ionization coefficient on the electric field strength are somewhat different for the conditions under consideration when the field strength vector is directed along the $\langle 100 \rangle$ and $\langle 111 \rangle$ axes. However, this difference can be considered insignificant [17]. Figure 2 also shows the corresponding dependence of the C_{II} coefficient calculated by us when using the formula (2) for the impact ionization process scattering rate. The results are obtained by numerically calculating the α coefficient by the Monte Carlo method and matching its values with the corresponding experimental data. The calculated C_{II} values (dashed curve) ensure the accuracy of ionization coefficient simulation by the Monte Carlo method with respect to the interpolation of the ex-

perimental values from [17] within 1 % in the 98 % confidence interval within the framework of the used analytical model of the silicon band structure.

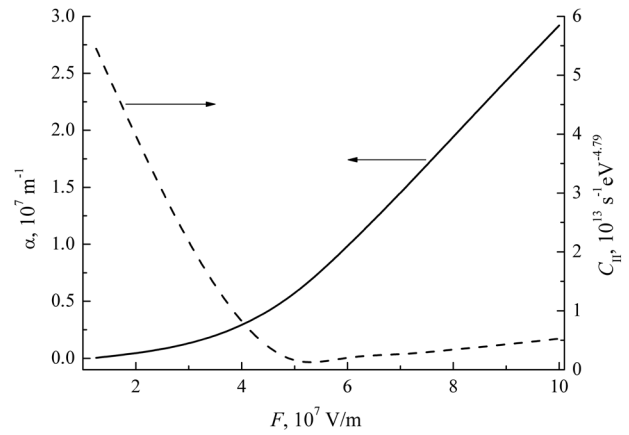


Figure 2 – Dependences of the electron ionization coefficient (solid curve) and the constant C_{II} (dashed curve) versus electric field strength in bulk silicon

As it can be seen from the Figure 2, the dependence of the coefficient C_{II} on the electric field strength F is not monotonic. The minimum of the dependence is observed for the value of the electric field strength $F \approx 5 \cdot 10^7$ V/m. With a decrease in the electric field strength from $5 \cdot 10^7$ to $1.25 \cdot 10^7$ V/m, a sharp increase in the coefficient C_{II} is observed from $1.61 \cdot 10^{12}$ to $5.45 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1} \text{ eV}^{-4.79}$. For the electric field strength F equal to 10^7 V/m, the calculated value of C_{II} is already $4.3 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1} \text{ eV}^{-4.79}$ (not shown in the figure). Thus, using a simple approximation with a constant value of the parameter C_{II} , it is not possible to reconcile the calculated using the ensemble Monte Carlo method and the experimental values of the ionization coefficient α . The non-monotonic dependence of the C_{II} coefficient can be explained by the fact that, first of all, the threshold energy of impact ionization E_{th} is not constant and depends on the electric field strength [21].

To assess the influence of different values of the C_{II} parameter on the electrical characteristics of photodiodes Figure 3 shows simulated dependences of the current density on time under the influence of picosecond radiation pulses in a diode with a p - n -junction (a) and in diodes with a p - i - n -structure (b), (c) and (d) with a reverse bias between the electrodes $V_1 - V_2 = 5$ V, assuming different constant values of the C_{II} coefficient. The thickness of the undoped i -layer for the structure in Figure 3b) is 50 nm, for the structure in Figure 3c) is 100 nm, and for the structure in Figure 3d) is 200 nm. Solid

curves correspond to the calculated C_{II} values for the constant electric field strength in bulk silicon $F = 10^7$ V/m, dashed curves – $F = 5 \cdot 10^7$ V/m, dotted

curves – $F = 7 \cdot 10^7$ V/m, and dash-dotted curves – $F = 10^8$ V/m. The radiation begins to affect the diode structures at the time $t = 1$ ps.

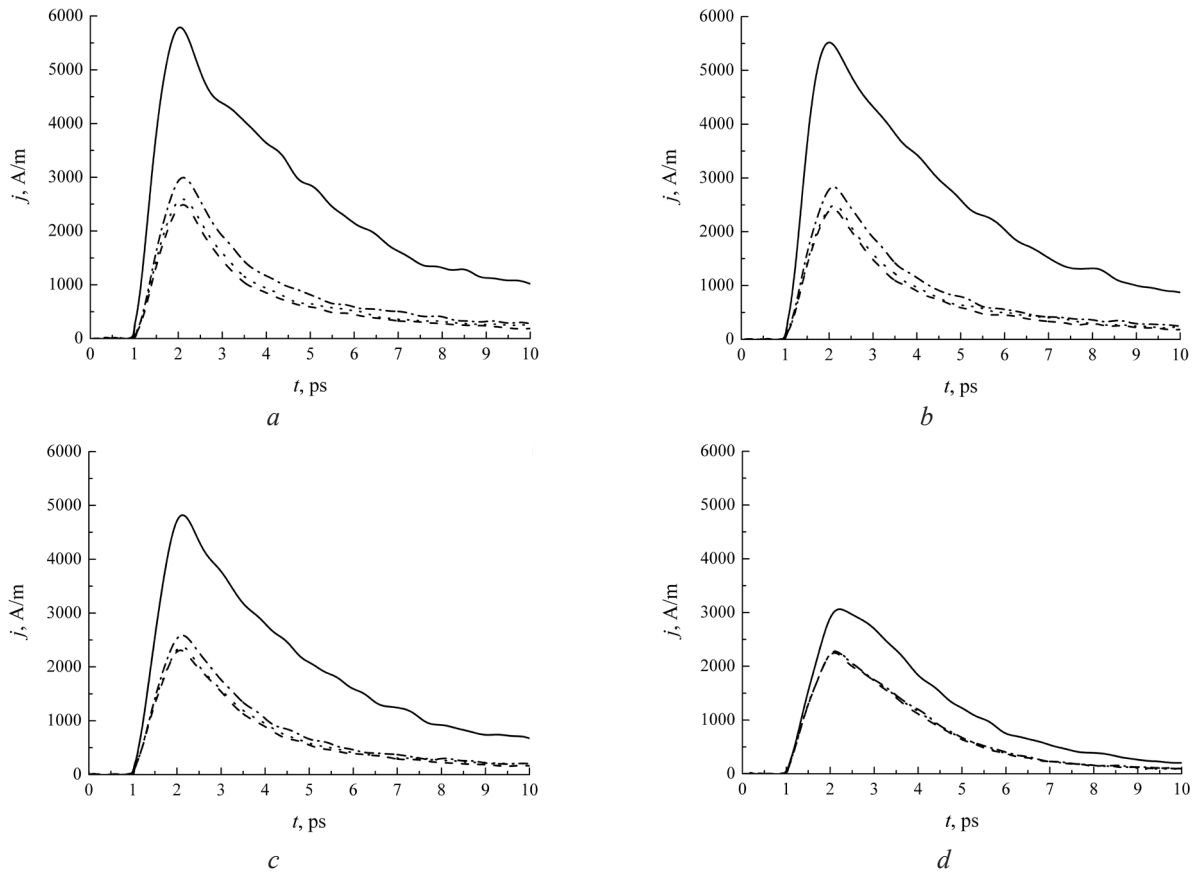


Figure 3 – Dependence of electric current density j versus time in a diode with p - n -junction (a) and p - i - n -structure (b), (c), and (d) under the reverse bias of 5 V

Thus, as can be seen from the current density versus time dependences shown in Figure 3, for all photodiode structures there is a significant difference in the calculated current density when using different values of the C_{II} coefficient corresponding to different values of the constant electric field strength in bulk silicon. Thus, the use of formula (2) with constant values of the C_{II} , b and E_{th} parameters for calculating the rate of the impact ionization process by electrons in semiconductor device structures with a significantly non-uniform electric field raises certain questions. Within the framework of the proposed model, it is apparently possible to use a variable value of the C_{II} coefficient, depending on the electric field strength. In this case, for self-consistent simulation of charge carrier transport processes by the ensemble Monte Carlo method, the impact ionization process rate becomes dependent not only on the charge carrier energy, but also on the local value of the electric field strength, and, conse-

quently, on the spatial coordinates and time. Thus, it can be concluded that such an approach will require constant recalculation of the impact ionization rate at each time step, which complicates the algorithm and should lead to an increase in computational costs when modeling the electrical characteristics of semiconductor device structures in which the electric fields are significantly non-uniform.

Conclusion

Dependence of the current density on time in submicron silicon photodiodes with a p - n -junction and a p - i - n -structure under the effect of picosecond radiation pulses with a wavelength of 650 nm and an intensity of $5 \cdot 10^{10}$ W/m² is calculated by means of numerical self-consistent simulation based on the ensemble Monte Carlo method. It was shown that taking into account the impact ionization process significantly affects the results of simulating

the photocurrent response. At the same time, simple models most often used in Monte Carlo simulation for calculating the rate of the impact ionization process, such as the Keldysh model, do not allow adequately reproducing dependence of the ionization coefficient on the electric field strength for a wide range of field strength values. Accordingly these models cannot properly take into account processes of avalanche multiplication of charge carriers during their optical generation in silicon photodiodes. Taking into account the obtained results, in order to improve the simulation's adequacy, it is proposed to use in the Keldysh formula the proportionality coefficient which depend on the local value of the electric field strength.

References

1. Filachev AM, Taubkin II, Trishenkov M. A. Solid-state photoelectronics. Photodiodes. Moscow: Fizmatkniga, 2011, 448 p.
2. Lozovoy KA, Douhan RMH, Dirko VV, Deeb H, Khomyakova KI, Kukenov OI, Sokolov AS, Akimenko NYu, and Kokhanenko AP. Silicon-based avalanche photodiodes: advancements and applications in medical imaging. *Nanomaterials*. 2023;(13):3078–1–3078–24. **DOI:** 10.3390/nano13233078
3. Bronzi D, Villa F, Tisa S, Tosi A, and Zappa F. SPAD figures of merit for photon-counting, photon-timing, and imaging applications: a review. *IEEE Sensors Journal*. 2016;16(1):3–12. **DOI:** 10.1109/JSEN.2015.2483565
4. Koziy AA, Losev AV, Zavodilenko VV, Kurochkin YuV, Gorbatshevich AA. Modern methods of detecting single photons and their application in quantum communications. *Quantum Electronics*. 2021;51(8):655–669. **DOI:** 10.1070/QEL17566
5. Borzdov VM, Zhevnyak OG, Komarov FF, Galenchik VO. Monte Carlo simulation of device structures of integrated electronics. Minsk: BSU, 2007, 175 p.
6. Jacoboni C, Lugli P. The Monte Carlo method for semiconductor device simulation. Wien–New York: Springer, 2012, 359 p.
7. Aboud S, Saraniti M, Goodnick S, Brodschelm A, and Leitenstorfer A. Full-band Monte Carlo simulations of photo excitation in silicon diode structures. *Semiconductor Science and Technology*. 2004;(19):S301–S303. **DOI:** 10.1088/0268-1242/19/4/101
8. Yanikgonul S, Leong V, Ong JR, Png CE, and Krivitsky L. 2D Monte Carlo simulation of silicon waveguide-based single-photon avalanche diode for visible wavelengths. *Optics Express*. 2018;26(12):15232–15246. **DOI:** 10.1364/OE.26.015232
9. Borzdov AV, Borzdov VM, Vyurkov VV. Monte Carlo simulation of picosecond laser irradiation photore-
10. Zhou X, Ng JS, Tan CH. A simple Monte Carlo model for prediction of avalanche multiplication process in Silicon. *Journal of Instrumentation*. 2012;7(08):P08006–1–10. **DOI:** 10.1088/1748-0221/7/08/P08006
11. Chau Q. An efficient numerical approach to studying impact ionization in sub-micrometer devices. *Journal of Computational Electronics*. 2014;13:329–337. **DOI:** 10.1007/s10825-013-0536-x
12. Chau Q. New Models for Impact Ionization in Submicrometer Devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2014;61(4):1153–1160. **DOI:** 10.1109/TED.2014.2306417
13. Ridley BK. Soft-threshold lucky drift theory of impact ionization in semiconductors. *Semiconductor Science and Technology*. 1987;2:116–122. **DOI:** 10.1088/0268-1242/2/2/009
14. Kamakura Y, Mizuno H, Yamaji M, Morifuji M, Taniguchi K, Hamaguchi C, Kunikiyo T, Takenaka M. Impact ionization model for full band Monte Carlo simulation. *Journal of Applied Physics*. 1994;75(7):3500–3506. **DOI:** 10.1063/1.356112
15. Kunikiyo T, Takenaka M, Morifuji M, Taniguchi K, Hamaguchi C. A model of impact ionization due to the primary hole in silicon for a full band Monte Carlo simulation. *Journal of Applied Physics*. 1996;79(10):771–7725. **DOI:** 10.1063/1.362375
16. Borzdov AV, Borzdov VM, Dorozhkin NN. Numerical simulation of electric characteristics of deep sub-micron silicon-on-insulator MOS transistor. *Devices and Methods of Measurements*. 2016;7(2):161–168. **DOI:** 10.21122/2220-9506-2016-7-2-161-168
17. Martin MJ, Gonzalez T, Velazquez JE, Pardo D. Simulation of electron transport in silicon: impact-ionization processes. *Semiconductor Science and Technology*. 1993;(8):1291–1297. **DOI:** 10.1088/0268-1242/8/7/017
18. Robbins VM, Wang T, Brennan KF, Hess K and Stillman GE. Electron and hole impact ionization coefficients in (100) and in (111) Si. *Journal of Applied Physics*. 1985;58,(12):4614–4617. **DOI:** 10.1063/1.336229
19. Takayanagi I, Matsumoto K, and Nakamura J. Measurement of electron impact ionization coefficient in bulk silicon under a low electric field. *Journal of Applied Physics*. 1992;72(5):1989–1992. **DOI:** 10.1063/1.351625
20. Maes W, De Meyer K. and Van Overstraeten R. Impact ionization in silicon: a review and update. *Solid-State Electronics*. 1990;33(6):705–718. **DOI:** 10.1016/0038-1101(90)90183-F
21. Redmer R, Madureira JR, Fitzner N, Goodnick SM, Schattke W, and Schöll E. Field effect on the impact ionization rate in semiconductors. *Journal of Applied Physics*. 2000;87(2):781–788. **DOI:** 10.1063/1.371941

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-147-157

Коррекция влияния помех на результаты зондовой микроскопии вытянутых объектов с использованием прогнозных оценок рельефа

П.В. Гуляев

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук,
ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия

Поступила 27.03.2025

Принята к печати 14.05.2025

Корректное измерение длины объектов на изображениях, искажённых воздействием помех, является важной задачей зондовой микроскопии. Существующие методы измерения не в полной мере учитывают специфику конкретной предметной области. Целью настоящей работы являлась разработка нетребовательного к вычислительным ресурсам алгоритма выделения остовов объектов, ориентированного на особенности изображений в сканирующей зондовой микроскопии. Ограниченное быстродействие зондового микроскопа, загрязнение поверхности образца, неидеальность зонда приводят к типовым помехам в виде полос, $1/f$ шумов, флуктуаций яркости и вызывают дефрагментацию остовов объектов и снижение точности измерений длины. Предложенный в работе метод использует прогнозные оценки рельефа для устранения влияния этих помех. Прогноз определяется на основе экстраполяции информации из столбцов раstra уже отсканированной части изображения. Прогнозный интервал равен одному интервалу дискретизации изображения. Совокупность прогнозных оценок формирует прогнозное изображение, которое затем используется при определении длины объектов. Особенность прогнозных изображений заключается в увеличении резкости искажённых помехами областей. Это позволило при выделении объектов с помощью детекторов кривизны дефрагментировать остовы и точнее измерить их длину. Исследования показали, что увеличение интегральной ошибки прогнозирования является признаком необходимости дополнительной обработки изображений от низкочастотных или ударных помех. При этом использование прогнозных изображений снижает относительное отклонение количества нераспознанных остовов и среднее отклонение максимальной измеренной длины. Установлено, что управляющая информация в виде прогнозных оценок может использоваться при обработке изображений в зондовой микроскопии для детектирования и частичного устранения помех. Формирование прогнозных изображений усиливает резкость объектов и повышает вероятность их корректного выделения методами, основанными на анализе изменений функции яркости.

Ключевые слова: сканирующий зондовый микроскоп, прогнозное изображение, остовы, контроль длины

Адрес для переписки:

Гуляев П.В.
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия
e-mail: lucac@inbox.ru

Address for correspondence:

Gulyaev P.V.
Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences,
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia
e-mail: lucac@inbox.ru

Для цитирования:

П.В. Гуляев.
Коррекция влияния помех на результаты зондовой микроскопии
вытянутых объектов с использованием прогнозных оценок рельефа.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 2. С. 147–157.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-147-157

For citation:

Gulyaev P.V.
Correction of Disturbances Influence on Results of Elongated Objects's
Probe Microscopy Using Predictive Relief Estimates.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(2):147–157. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-147-157

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-147-157

Correction of Disturbances Influence on Results of Elongated Objects's Probe Microscopy Using Predictive Relief Estimates

P.V. Gulyaev

Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia

Received 27.03.2025

Accepted for publication 14.05.2025

Abstract

Correct measurement of the distorted objects length in images is an important task of probe microscopy. Existing measurement methods do not fully take into account the specifics of a given subject area. The purpose of this work was to develop an algorithm for locating the objects skeletons adapted to the images peculiarities in scanning probe microscopy and does not require significant computing resources. The limited speed of the probe microscope, contamination of the sample surface, and Non-ideality of the probe lead to typical disturbances in the form of stripes, $1/f$ noise, and brightness fluctuations and cause defragmentation of the skeletons of objects and a decrease in the accuracy of length measurements. The method proposed in this paper uses predictive relief estimates to eliminate the influence of these disturbances. The forecast is calculated based on extrapolation of information from the raster columns of the already scanned part of the image. The forecast interval is equal to the discretization interval of the image. The set of forecast estimates forms a predictive image, which is subsequently used to determine the length of objects. The peculiarity of predictive images is the sharpening of areas distorted by disturbances. This made it possible to defragment the skeletons and measure their length more accurately when locating objects using curvature detectors. Studies have shown that an increase in the integral prediction error is a indication of the need for additional image filtering from low-frequency or shock interference. At the same time, the use of predictive images reduces the relative deviation of the number of unrecognized skeletons and the average deviation of the maximum measured length. It has been established that control information in the form of forecast estimates can be used in image processing in probe microscopy to detect and partially eliminate disturbances. The formation of predictive images enhances the sharpness of objects and increases the probability of their correct selection using methods based on the analysis of changes in the brightness function.

Keywords: scanning probe microscope, predictive imaging, skeletons, length monitoring

Адрес для переписки:

Гуляев П.В.
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия
e-mail: lucac@inbox.ru

Address for correspondence:

Gulyaev P.V.
Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences,
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia
e-mail: lucac@inbox.ru

Для цитирования:

П.В. Гуляев.
Коррекция влияния помех на результаты зондовой микроскопии
вытянутых объектов с использованием прогнозных оценок рельефа.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 2. С. 147–157.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-147-157

For citation:

Gulyaev P.V.
Correction of Disturbances Influence on Results of Elongated Objects's
Probe Microscopy Using Predictive Relief Estimates.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(2):147–157. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-147-157

Введение

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) позволяет получать прямые топографические изображения поверхности, которые могут использоваться для определения геометрических размеров объектов, например, длины молекул, частиц волокон, искусственных формирований. Программное обеспечение серийных микроскопов (Nova, Altami Studio), а также специализированные программы для обработки изображений (SPIP, ImageJ, MountainsSPIP) содержат инструменты для автоматизированного поиска объектов и определения их длины. Однако эти инструменты, как правило, требуют предварительной обработки изображений. Некоторая часть процессов обработки (удаление наклона, удаление высокочастотных помех) может быть автоматизирована. Другая часть обработки, например, сглаживание, выравнивание яркости выполняется под контролем оператора, поскольку в автоматическом режиме форма и геометрические параметры объектов могут быть искажены. Тем не менее, даже после обработки изображения зачастую содержат помехи, способные повлиять на результаты измерения. Например, изображения могут содержать выпадающие строки, ступеньки, вызванные виброакустическими воздействиями, контактом зонда с поверхностью, множественными микровыступами на вершине зонда, а также неоптимальными настройками цепи регулирования СЗМ [1, 2]. Такие искажения влияют на определение длины вытянутых объектов за счёт их фрагментации. При этом фрагментация проявляется сильнее, если для отсева фоновых элементов изображения применяется пороговая фильтрация по яркости.

Наиболее распространены следующие подходы к определению длины объектов на изображениях. Первый подход связан с предварительной сегментацией изображения [3] и последующим определением размеров сегментов посредством формирования контуров [4] или аппроксимацией геометрическими примитивами, например, отрезками с помощью преобразования Хафа или с помощью нейросетей [5]. Такой подход применяется для объектов с типовыми, достаточно простыми формами. Для других объектов распространён подход,

связанный с выделением остова и определением его длины.

Существующие методы выделения остовов можно разделить на классические [6] и нейросетевые [7]. Нейросети требуют значительных ресурсов и разрабатываются для более массовых в отличие от зондовой микроскопии приложений, поэтому их применение для коррекции измерений длины объектов можно считать избыточным. Обзор классических методов выделения остовов [8–10] показал, что наиболее распространены менее требовательные к ресурсам и основанные, как правило [8], на морфологических операциях обработки методы. Это подтверждается их реализацией в составе программного пакета ImageJ с открытыми архитектурой и набором подключаемых библиотек. Недостатки этих методов заключаются в следующем.

1. Методы с бинаризацией (например, плагин BoneJ пакета ImageJ) плохо работают на слабоконтрастных изображениях, изображениях с перепадами яркости (рисунок 1а). Это приводит к фрагментации остовов (рисунок 1б).

2. Остовы плотно упакованных или накладывающихся объектов могут смыкаться (плагин BoneJ пакета ImageJ, рисунок 1с).

3. Остовы объектов с неоднородностями ширины могут иметь отростки (плагин Skeletonise 2D/3D, рисунок 1д).

Представленные недостатки во многом обусловлены красивыми шумами, вариациями формы, яркости объектов [11], а также нечёткостью их границ [12]. Для их устранения разрабатываются различные специализированные алгоритмы, ориентированные под определённый класс задач. Однако они применяются на изображениях после процедуры бинаризации и структуризации остова, которая при наличии некомпенсированных помех может привести к появлению существенных разрывов, не устранимых морфологическими преобразованиями. В связи с этим представляется актуальной задача выделения и дефрагментации остовов объектов непосредственно на полутоновом изображении. Целью настоящей работы являлась разработка нетребовательного к ресурсам алгоритма выделения остовов объектов, ориентированного на особенности изображений в сканирующей зондовой микроскопии.

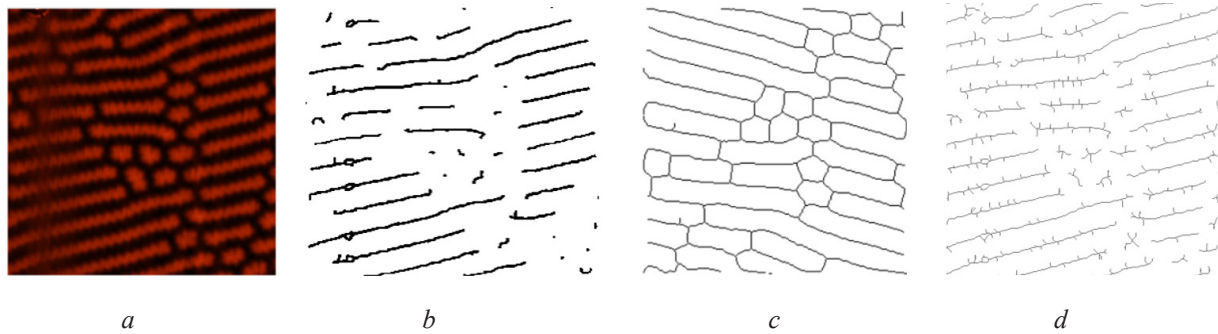


Рисунок 1 – Исходное изображение вытянутых объектов $5 \times 50 \times 1$ мкм (a) и результаты выделения остовов с дефрагментацией (b), смыканием (c) и образованием отростков (d)

Figure 1 – The initial image of elongated objects of $50 \times 50 \times 1$ μm (a) and results of skeletons' separation with defragmentation (b), skeletons closing (c) and skeletons' branches formation (d)

Для выделения остовов объектов непосредственно на полутоновом изображении в зондовой микроскопии могут использоваться детекторы кривизны [13]. Такие детекторы анализируют профилограммы (строки или столбцы) изображения посредством вписывания в локальные окрестности окружности или сферы, размеры которых определяют степень кривизны поверхности. Преимущества детекторов по сравнению с существующими методами, описанными выше, заключаются в следующем.

1. Функция кривизны имеет локальные экстремумы в месте расположения объектов, например, частиц или волокон. Это позволяет детектировать объекты различной яркости (фоновые и расположенные на переднем плане) на слабоконтрастных изображениях.

2. Поиск экстремумов кривизны и точек остова в детекторе происходит вдоль строк и столбцов раstra изображения, исключая эффект смыкания.

3. Для каждого поперечного сечения объекта, аппроксимированного окружностью, определяется одна точка остова, что исключает формирование отростков.

В настоящей работе рассмотрим решение задачи дефрагментации остовов объектов с помощью аппарата прогнозирования, используемого в СЗМ для увеличения быстродействия микроскопа за счёт упреждающего управления, повышения сохранности зондов [14], снижения уровня помех на изображениях.

Прогнозные изображения и их применение

Рассмотрим основные принципы прогнозирования и построения прогнозных изображений в зондовой микроскопии. Большинство алгоритмов прогнозирования основываются на взаимосвязи уровней яркости смежных точек изображения и определяют прогнозную оценку $\bar{Z}_n$ в виде линейной комбинации яркостей m этих точек [14, 15]:

$$\bar{Z}_n = \sum_{i=1}^m \alpha_i Z_{n-i},$$

где $Z(x, y)$ – двумерная функция яркости.

Исследования [14] показали, что при величине прогнозного интервала Δy в один интервал растровой сетки изображения полином первой степени имеет достаточную для управления сканированием зондового микроскопа точность. Этот полином описывает поведение поверхности на участке столбца $[y_{i-1}, y_i]$, а прогнозирование заключается в его экстраполяции до точки y_{i+1} (рисунок 2):

$$Z(y + \Delta y) = \sum_{j=0}^1 a_j (y + \Delta y)^j. \quad (1)$$

Поскольку интервалы между y_{i+1} , y_i , y_{i-1} равны, выражение (1) можно упростить и записать в форме, соответствующей рисунку 2:

$$Z(y_{i+1}) = 2 \cdot Z(y_i) - Z(y_{i-1}). \quad (2)$$

Согласно рисунку 2 на основе двух измеренных строк (профилограмм) СЗМ-изображения

можно получить прогнозную профилограмму, которая используется для управления сканированием. После полного завершения

сканирования из набора прогнозных профилограмм формируется прогнозное изображение.

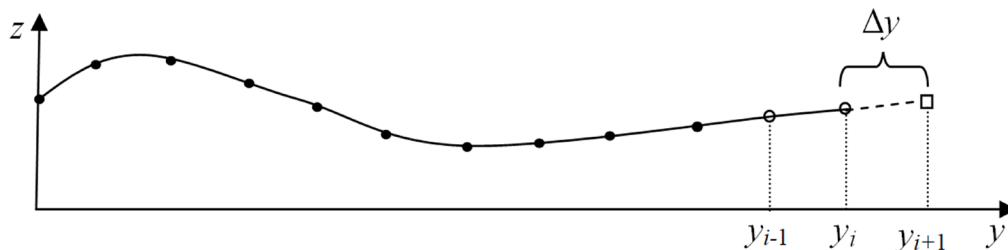


Рисунок 2 – Прогнозирование рельефа поверхности вдоль столбца раstra СЗМ-изображения: ● – измерительные точки; ○ – измерительные точки, используемые для прогноза; □ – прогнозная точка

Figure 2 – Predicting the surface relief along the raster column of a SPM image: ● – measuring points; ○ – measuring points used for forecasting; □ – forecast point

Перепишем выражение (2) в следующем виде:

$$Z(y_{i+1}) = Z(y_i) + \frac{\partial Z}{\partial y} \Delta y. \quad (3)$$

Согласно (3) операция прогнозирования эквивалентна пропорционально-дифференциальному звену. Если представить профилограмму в виде сигнала и подать на вход такого звена, то на выходе получим сигнал, в котором колебания яркости в области пересечения объектов будут усилены. Это означает повышение резкости в прогнозном изображении и повышение вероятности выделения таких перепадов, например, детекторами кривизны.

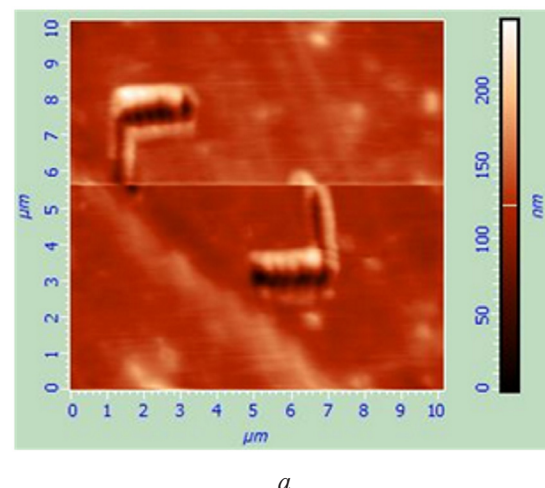
Повышение резкости не единственная полезная опция прогнозирования при обработке СЗМ-изображений. Так расхождение прогнозных оценок и измеренных значений может считаться признаком воздействия внешних помех. На рисунке 3а приведено изображение со смещением строк раstra, вызванным ударной помехой. На рисунке 3б приведены измеренная (кривая 1) и прогнозная (кривая 2) профилограммы изображения в смещённой строке, а также график (кривая 3) интегральной ошибки прогнозирования профиля:

$$\varepsilon_j = \sum_{i=1..j} \frac{|Z_i^m - Z_i^p|}{|Z_i^m|},$$

где $j = 1..N$; N – количество пикселей в строке изображения ($N = 256$); Z_i^m – измеренное

значение; Z_i^p – прогнозное значение. Сравнение графиков (рисунок 3б) с аналогичными графиками (рисунок 3с) для строки изображения, полученной без помех, показали существенное увеличение интегральной ошибки прогнозирования, что является косвенным признаком воздействия помех и может быть причиной для дополнительной обработки изображения и корректировки результатов измерений.

Рассмотрим, как обработка прогнозных изображений влияет на результат выделения остовов удлинённых объектов. На рисунке 4а представлено изображение триоксида молибдена (<http://www.ntmdt-china.com/resources/scan-gallery/material-science-1/moo3.htm>, режим доступа: 20.12.2024) и отмечена строка изображения, для которой построены реальная 1 и прогнозная 2 профилограммы (рисунок 4б).



a

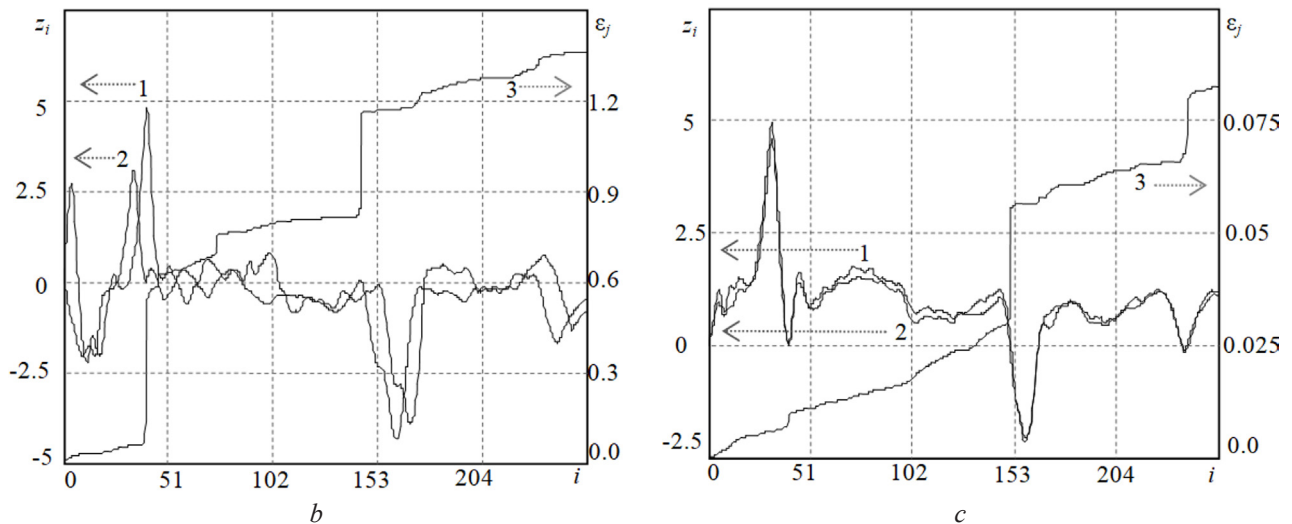
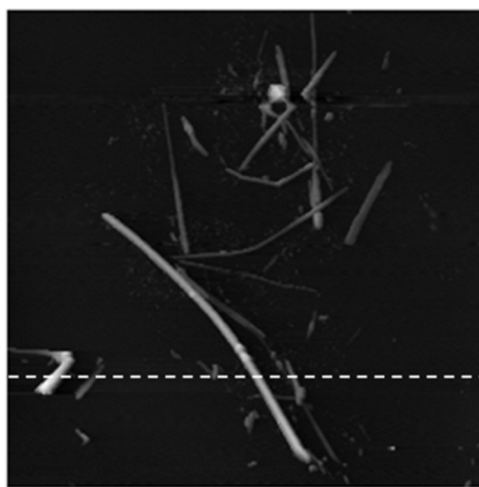
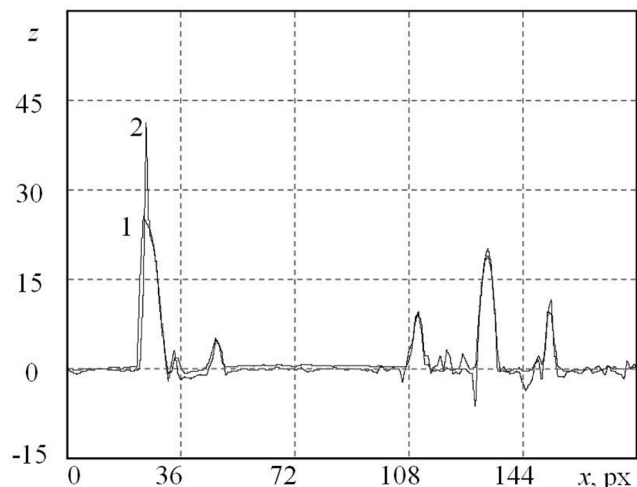


Рисунок 3 – Изображение со смещённой строкой (a), профилограммы и интегральная ошибка в искажённой (смещённой) строке (b), профилограммы и интегральная ошибка в неискажённой строке (c); 1 – измеренная, 2 – прогнозная кривая; 3 – интегральная ошибка прогнозирования профиля

Figure 3 – Image with shifted row (a), profilograms of shifted row and integral error for shifted row (b), profilograms of shifted row and integral error for normal row (c); 1 – measured, 2 – forecast curve; 3 – integral error of profile prediction



a



b

Рисунок 4 – Изображение 30×30×0,15 мкм (a) и профилограммы (b) вдоль штриховой линии (1 – реальная; 2 – прогнозная)

Figure 4 – Image 30×30×0.15 μm (a) and its profilograms (b) along the dashed line (1 – real; 2 – forecasted)

Согласно (3) прогнозная профилограмма отличается большим диапазоном колебаний на участках с резким изменением яркости, что повышает вероятность локализации таких участков детектором кривизны и точность выделения остовов исследуемых объектов на основе прогнозного изображения.

Результаты и их обсуждение

Преимущества совместного использования прогнозных профилограмм и детекторов кривизны заключаются в следующем:

- использование одного набора данных (строка или столбец раstra изображения)

позволяет избежать дополнительного согласования количественных результатов обработки;

– нет необходимости в дополнительных вычислениях, т. к. прогнозное изображение формируется в процессе сканирования;

– усиление изменений яркости на объектах в прогнозной профилограмме повышает вероятность детектирования остова.

Результаты выделения остовов объектов на исходном и прогнозном изображении приведены в таблицах 1 и 2 и на рисунках 5–8. В частности, на рисунке 5 показано изображение

плёнки феррит-граната (www.ntmdt-china.com/resources/scan-gallery/ferrite-garnet-film/ferrite-garnet-film.htm, режим доступа: 20.12.2024), а также результат выделения остовов. Из рисунков 5*b* и 7*b* следует, что детектор кривизны позволил выделить остовы целевых объектов только с существенными разрывами. Применение прогнозных изображений (рисунок 6*a*) позволило существенно дефрагментировать остовы (рисунок 6*b*). Аналогичная ситуация наблюдается на оригинальном и прогнозном изображениях (рисунки 7, 8) трубок триоксида молибдена и результаты выделения остовов.

Таблица 1 / Table 1

Результаты измерения остовов объектов на исходном (рисунок 5*a*) и прогнозном (рисунок 6*a*) изображениях

Results of the objects skeletons measuring in the initial (Figure 5*a*) and forecasted (Figure 6*a*) images

Номер объекта на рисунке 5 <i>a</i> The number of the object in Figure 5 <i>a</i>	Длина остова, пиксель / Skeleton length, pixel		
	Истинная / True	Измеренная без использования прогноза / Measured without using a prediction	Измеренная с использованием прогноза / Measured using a prediction
1	101	48	51
2	160	13 (78)*	141
3	170	13 (76)*	172
4	110	16 (40)*	110
5	101	46 (12)*	104
6	97	43 (10)*	102
7	85	33 (11)*	87
8	15	19	19
9	64	29	65
10	130	10	135
11	49	53	55
12	36	36	37

* – распознано два остова, длина второго приведена в скобках

* – two skeletons are recognized, the length of the second is given in parentheses

Анализ таблиц 1 и 2 показал, что использование прогнозного изображения позволило повысить качественный (число верно распознанных остовов) и количественный (погрешность определения длины остова)

показатели распознавания. Качественный показатель ε_N определялся как относительное отклонение количества нераспознанных остовов N от общего числа N_0 :
$$\varepsilon_N = N/N_0.$$

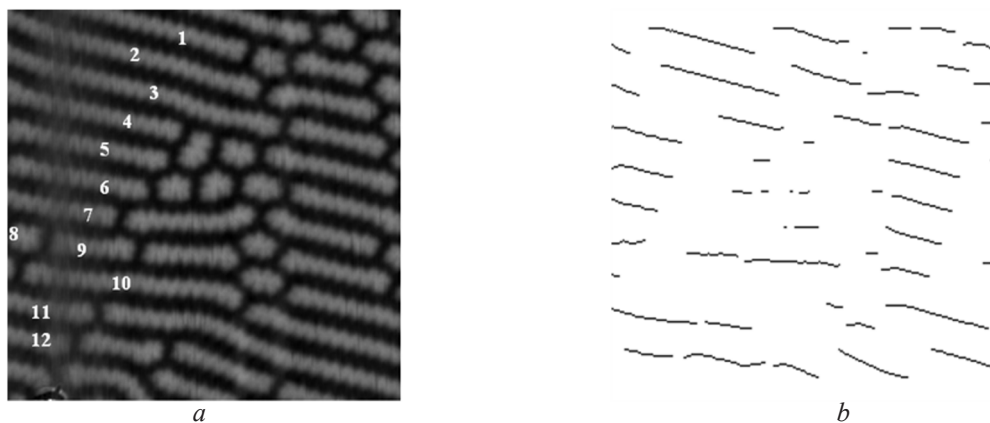


Рисунок 5 – Исходное изображение плёнки феррит-граната (a) и выделенные остовы (b)

Figure 5 – Initial image of the ferrite-garnet film (a) and localized skeletons (b)

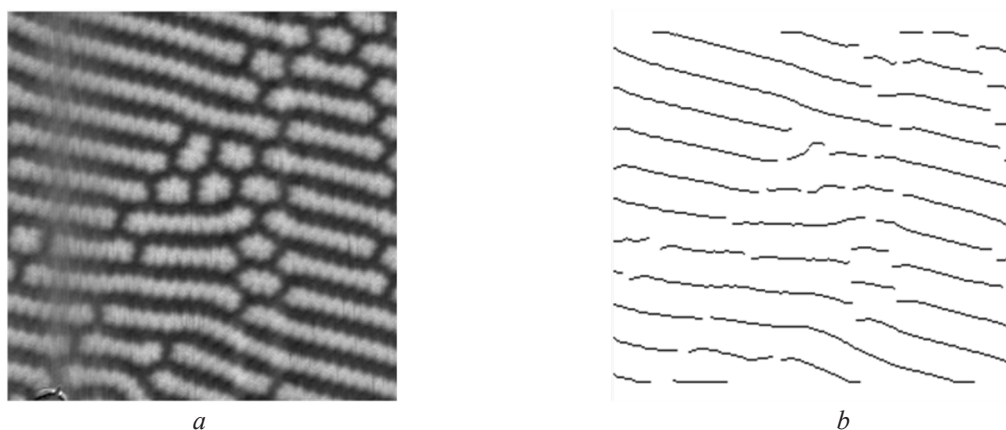


Рисунок 6 – Прогнозное изображение плёнки феррит-граната (a) и выделенные остовы (b)

Figure 6 – Forecasted image of the ferrite-garnet film (a) and localized skeletons (b)

Количественным показателем распознавания являлась величина ε_L , которая определялась как среднее отклонение максимальной измеренной длины i -го остова L_i от истинного значения L_{0i} :

$$\varepsilon_L = \sum_{i=1..N} (|\max(L_i) - L_{0i}|) / N.$$

Расчёт величин ε_N и ε_L для рисунков 5 и 7 показал следующее.

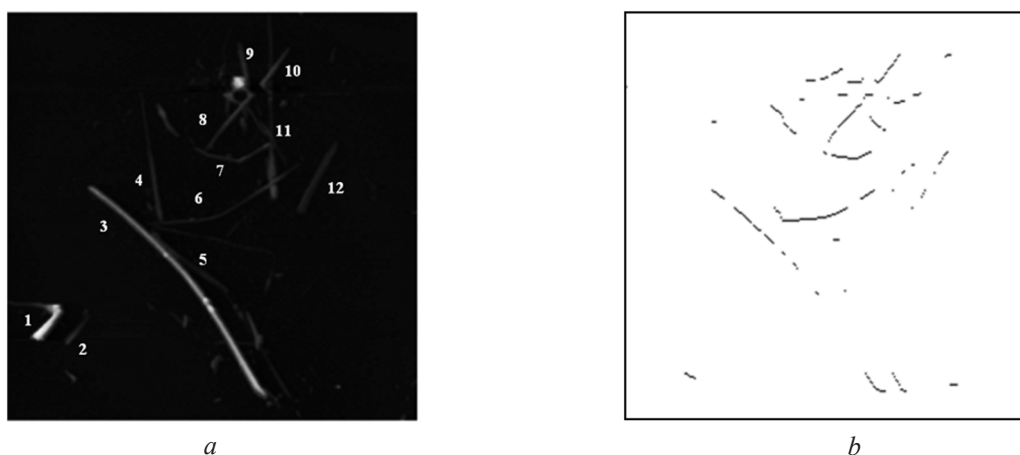


Рисунок 7 – Исходное изображение триоксида молибдена (a) и выделенные остовы (b)

Figure 7 – Initial image of molybdenum trioxide (a) and localized skeletons (b)

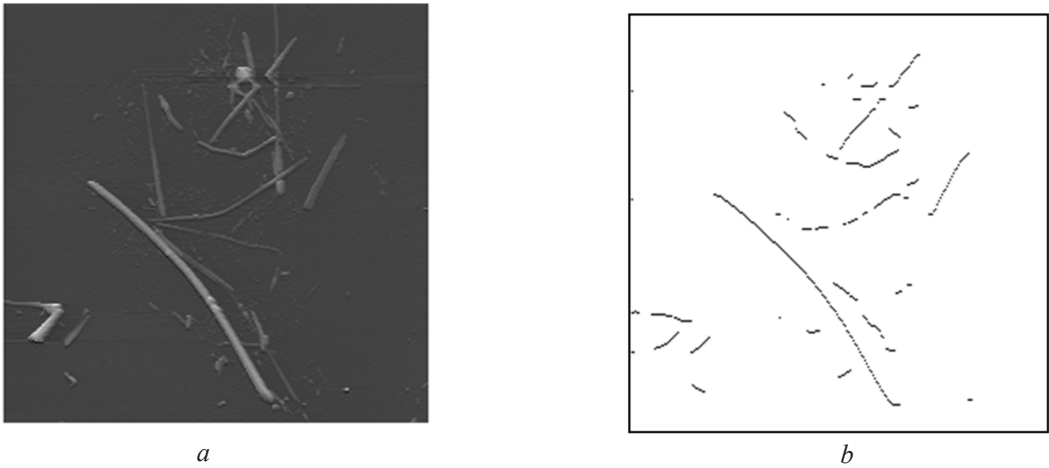


Рисунок 8 – Прогнозное изображение триоксида молибдена (a) и выделенные остовы (b)
Figure 8 – Predictive image of molybdenum trioxide (a) and localized skeletons (b)

Таблица 2 / Table 2

Результаты измерения остовов объектов на исходном (рисунок 7a) и прогнозном (рисунок 8a) изображении

Results of the objects skeletons measuring in the initial (Figure 7a) and forecasted (Figure 8a) images

Номер объекта на рисунке 5a The number of the object in Figure 5a	Длина остова, пиксель / Skeleton length, pixel		
	Истинная / True	Измеренная без использования прогноза / Measured without using a prediction	Измеренная с использованием прогноза / Measured using a prediction
1	24	н/р	19
2	22	н/р	14
3	168	77	164
4	76	н/р	н/р
5	49	н/р	16
6	92	59	77
7	47	30	31
8	41	40	40
9	20	н/р	н/р
10	27	23	26
11	113	н/р	н/р
12	45	34	43

Примечание: н/р – не распознано
Note н/р – not recognized

Для искажённых помехой объектов, представленных и пронумерованных на рисунке 5a, применение прогнозного изображения позволило снизить величину ε_L с 0,48 до 0,1 (таблица 1). В другом случае (рисунок 7a, таблица 2) использование прогнозного изображения

снизило величину ε_N с 0,5 до 0,25, а величину ε_L с 0,64 до 0,40.

Заключение

Установлено, что управляющая информация в виде прогнозных оценок может использоваться при обработке изображений в сканирующей зондовой микроскопии. В частности, увеличение интегральной ошибки прогнозирования является признаком необходимости дополнительной обработки изображений от низкочастотных или ударных помех, оказывающих влияние на отображение удлинённых объектов. Кроме того, формирование и применение при измерениях прогнозных изображений позволяет нивелировать влияние таких помех, увеличить число верно распознанных остовов, а также снизить погрешность определения длины.

Список использованных источников

1. Persky E., Vardi N., Shperber Y., Kalisky B. Improving the sensitivity of scanning probe microscopy with mechanical vibrations. *Appl. Phys. Lett.*, 2018, vol. 113, p. 173101. **DOI:** 10.1063/1.5051620
2. Eaton P., West P. *Atomic Force Microscopy*. Oxford university press, 2010. **DOI:** 10.1093/acprof:oso/9780199570454.001.0001
3. Ronneberger O., Fischer Ph., Brox T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Cham., 2015, vol. 9351, pp. 234–241. **DOI:** 10.1007/978-3-319-24574-4_28
4. Ramadevi Y., Sridevi T., Poornima B., Kalyani B. Segmentation And Object Recognition Using Edge Detection Techniques, *International Journal of Computer Science and Information Technology*, 2010, vol. 2, pp. 153–161. **DOI:** 10.5121/IJCSIT.2010.2614
5. Okunev A.G., Mashukov M.Y., Nartova A.V., Matveev A.V. Nanoparticle Recognition on Scanning Probe Microscopy Images Using Computer Vision and Deep Learning. *Nanomaterials*, 2020, vol. 10, no. 7, p. 1285. **DOI:** 10.3390/nano10071285
6. Saha K., Borgfors G., di Baja G.S. A survey on skeletonization algorithms and their applications. *Pattern Recognition Letters*, 2016, vol. 76, pp. 3–12. **DOI:** 10.1016/j.patrec.2015.04.006
7. Shen W. [et al.]. DeepSkeleton: Learning Multi-Task Scale-Associated Deep Side Outputs for Object Skeleton Extraction in Natural Images. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, vol. 26, pp. 5298–5311. **DOI:** 10.1109/tip.2017.2735182

8. Гонсалес Р.С., Вудс Р.Е. Цифровая обработка изображений. Изд. 3-е, испр. и доп. / Пер. с англ. Л.И. Рубанова, П.А. Чочиа. М.: Техносфера, 2012, 1104 с.

9. Sultane C., Bhalerao M., Bonde S. Character recognition based on skeletonization: a survey. *International Journal of Advanced Research*, 2017, vol. 5, pp. 1503–1519. **DOI:** 10.21474/IJAR01/4564

10. Russ J.C., Neal F.B. *The Image Processing Handbook*. CRC Press, 2017. 7th Edition. 1056 P. **DOI:** 10.1201/b18983

11. Sebastian T.B., Klein P.N., Kimia B.B. Recognition of shapes by editing their shock graphs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2024, vol. 26, no. 5, pp. 550–571. **DOI:** 10.1109/TPAMI.2004.1273924

12. Liu Wenping [et al.]. Distance Transform-Based Skeleton Extraction and Its Applications in Sensor Networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2013, vol. 24, no. 9, pp. 1763–1772. **DOI:** 10.1109/TPDS.2012.300

13. Гуляев П.В. Сегментация изображений фрагментированных реперных меток с использованием комбинированных детекторов кривизны поверхности в зондовой микроскопии / П.В. Гуляев, Е.Ю. Шелковников // *Химическая физика и мезоскопия*. – 2023. – Т. 25. – № 1. – С. 5–12. **DOI:** 10.15350/17270529.2023.1.1

14. Липанов А.М. Применение аппарата прогнозирования в сканирующих устройствах растрового типа / А.М. Липанов, Ю.К. Шелковников, М.Р. Гафаров, П.В. Гуляев // *Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика*. – 2010. – № 7. – С. 59–64.

15. Ватолин Д. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. / Д. Ватолин, А. Ратушняк, М. Смирнов, В. Юкин. – М.: Диалог-МИФИ, 2002. – 384 с.

References

1. Persky E, Vardi N, Shperber Y, Kalisky B. Improving the sensitivity of scanning probe microscopy with mechanical vibrations. *Appl. Phys. Lett.* 2018;(113): 173101. **DOI:** 10.1063/1.5051620
2. Eaton P, West P. *Atomic Force Microscopy*. Oxford university press, 2010. **DOI:** 10.1093/acprof:oso/9780199570454.001.0001
3. Ronneberger O, Fischer Ph, Brox T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Cham. 2015;(9351):234-241. **DOI:** 10.1007/978-3-319-24574-4_28

4. Ramadevi Y, Sridevi T, Poornima B, Kalyani B. Segmentation And Object Recognition Using Edge Detection Techniques, *International Journal of Computer Science and Information Technology*. 2010;(2):153-161. **DOI:** 10.5121/IJCSIT.2010.2614
5. Okunev AG, Mashukov MY, Nartova AV, Matveev AV. Nanoparticle Recognition on Scanning Probe Microscopy Images Using Computer Vision and Deep Learning. *Nanomaterials*. 2020;10(7):1285. **DOI:** 10.3390/nano10071285
6. Saha K, Borgefors G, di Baja GS. A survey on skeletonization algorithms and their applications. *Pattern Recognition Letters*. 2016;(76):3-12. **DOI:** 10.1016/j.patrec.2015.04.006
7. Shen W. [et al.]. DeepSkeleton: Learning Multi-Task Scale-Associated Deep Side Outputs for Object Skeleton Extraction in Natural Images. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2016;(26):5298-5311. **DOI:** 10.1109/tip.2017.2735182
8. Gonzalez RC, Woods RE. *Digital image processing*. Pearson Education. 2008;954 p.
9. Sultane C, Bhalerao M, Bonde S. Character recognition based on skeletonization: a survey. *International Journal of Advanced Research*. 2017;(5):1503-1519. **DOI:** 10.21474/IJAR01/4564
10. Russ JC, Neal FB. *The Image Processing Handbook*. CRC Press, 2017. 7th Edition. 1056 P. **DOI:** 10.1201/b18983
11. Sebastian TB, Klein PN, Kimia BB. Recognition of shapes by editing their shock graphs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2024;26(5):550-571. **DOI:** 10.1109/TPAMI.2004.1273924
12. Liu Wenping [et al.]. Distance Transform-Based Skeleton Extraction and Its Applications in Sensor Networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. 2013;24(9):1763-1772. **DOI:** 10.1109/TPDS.2012.300
13. Gulyaev PV, Shelkovnikov EY. Segmentation of Fragmented Reference Labels Images Using Combined Surface Curvature Detectors in Probe Microscopy. *Chemical Physics and Mesoscopy*. 2023;25(1):5-12. (In Russ.). **DOI:** 10.15350/17270529.2023.1.1
14. Lipanov AM, Shelkovnikov YuK, Gafarov MR, Gulyaev PV. Application of the forecasting device in raster scanning devices. *Management, Control, Diagnostics*. 2010;(7):59-64. (In Russ.).
15. Vatolin D, Ratushnyak A, Smirnov M, Yukin V. Data compression methods. Archiver device, image and video compression. M.: Dialog-MIFI. 2002;384 p.

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-158-167

Метод неразрушающего контроля состояния однофазных и трёхфазных трансформаторов на основе частотных характеристик

И.Л. Громыко, В.Н. Галушко

Белорусский государственный университет транспорта,
ул. Кирова, 34, г. Гомель 246653, Беларусь

Поступила 17.03.2025

Принята к печати 14.05.2025

Существуют различные методы диагностики трансформаторов. Анализ используемых методов и диагностических систем указывает на достижение определённой сложности дальнейшего развития существующих методов и диагностических систем. Это обусловлено сложностью входных сигналов, достаточно большим числом параметров, нелинейными множественными динамическими взаимосвязями. Одним из наиболее перспективных видов диагностики, на сегодняшний момент, является анализ частотных характеристик трансформатора. Целью данной работы являлось выявление различных дефектов трансформатора с помощью анализа частотных характеристик. В данной работе для обнаружения дефектов сердечника и обмоток использован анализ частотных характеристик на основе метода трёх вольтметров. В результате проведения серии экспериментов получены импедансные и фазо-частотные характеристики трансформаторов с дефектами сердечника и обмоток. Данные характеристики показывают значительные различия между нормальным и аварийным состояниями трансформаторов. Полученные характеристики в виде изображений являются исходными данными для свёрточной нейронной сети, определяющей вид дефекта. Использование частотных характеристик однофазных и трёхфазных трансформаторов при диагностировании предотказных состояний и отказов позволит создать универсальный программно-аппаратный комплекс диагностики для трансформаторов различных типов и номинальных данных.

Ключевые слова: трансформатор, частотные характеристики, метод трёх вольтметров

Адрес для переписки:

Громыко И.Л.
Белорусский государственный университет транспорта,
ул. Кирова, 34, г. Гомель 246653, Беларусь
e-mail: ivangromyko95@mail.ru

Address for correspondence:

Hramyka I.L.
Belarusian State University of Transport,
Kirova str., 34, Gomel 246653, Belarus
e-mail: ivangromyko95@mail.ru

Для цитирования:

И.Л. Громыко, В.Н. Галушко.
Метод неразрушающего контроля состояния однофазных и трёхфазных трансформаторов на основе частотных характеристик. Приборы и методы измерений. 2025. Т. 16. № 2. С. 158–167.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-158-167

For citation:

Hramyka IL, Galushko VN.
Method of Non-Destructive Control of Single-Phase and Three-Phase Transformers's Condition on the Basis of Frequency Characteristics. Devices and Methods of Measurements. 2025;16(2):158–167. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-158-167

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-158-167

Method of Non-Destructive Control of Single-Phase and Three-Phase Transformers's Condition on the Basis of Frequency Characteristics

I.L. Hramyka, V.N. Galushko

Belarusian State University of Transport,
Kirova str., 34, Gomel 246653, Belarus

Received 17.03.2025

Accepted for publication 14.05.2025

Abstract

Nowadays, there are many different methods of transformer diagnostics. The analysis of used methods and diagnostic systems indicates that a certain complexity of further development of existing methods and diagnostic systems has been achieved. This is due to the complexity of input signals, quite a large number of input factors, nonlinear multiple dynamic interrelationships with other parameters. One of the most promising types of diagnostics, to date, is frequency response analysis. The objective of this paper was to identify various transformer defects by analysing the frequency response. In this paper, frequency response analysis based on the three voltmeter method is used to detect core and winding defects. In a series of experiments, impedance and phase-frequency characteristics of transformers with core and winding defects are obtained. These characteristics show significant differences between the normal and emergency states of the transformers. The obtained characteristics in the form of pictures are the initial data for the convolutional neural network, which determines the type of defect. The use of frequency characteristics of single-phase and three-phase transformers in diagnostics of pre-failure states and failures will allow to create a universal hardware-software complex of diagnostics for transformers of different types and nominal data.

Keywords: transformer, frequency characteristics, method of three voltmeters

Адрес для переписки:

Громыко И.Л.
Белорусский государственный университет транспорта,
ул. Кирова, 34, г. Гомель 246653, Беларусь
e-mail: ivangromyko95@mail.ru

Address for correspondence:

Hramyka I.L.
Belarusian State University of Transport,
Kirova str., 34, Gomel 246653, Belarus
e-mail: ivangromyko95@mail.ru

Для цитирования:

И.Л. Громыко, В.Н. Галушко.
Метод неразрушающего контроля состояния однофазных и трёхфазных трансформаторов на основе частотных характеристик.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 2. С. 158–167.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-158-167

For citation:

Hramyka IL, Galushko VN.
Method of Non-Destructive Control of Single-Phase and Three-Phase Transformers's Condition on the Basis of Frequency Characteristics.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(2):158–167. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-158-167

Введение

Для диагностики неисправностей трансформаторов в настоящее время существует много различных методов. В качестве информативных параметров используются частичные разряды, анализ растворенного газа [1], спектроскопия, индекс поляризации, коэффициент диэлектрической проницаемости [2], сопротивление изоляции, измерение напряжения восстановления, ток поляризации и деполяризации, анализ частотных характеристик (*frequency response analysis* – FRA) и др. В последнее время FRA привлекает всё больше внимания для обнаружения механических повреждений из-за его высокой чувствительности к деформациям обмоток трёхфазных трансформаторов [3].

FRA – это сравнительный метод, основанный на сравнении передаточных функций между собой. Обмотка трансформатора может рассматриваться как сложная цепь, состоящая из индуктивных, ёмкостных и резистивных элементов. Межвитковые короткие замыкания (МКЗ), межфазные короткие замыкания (МФЗ) и соответствующие им предотказные состояния, деформации обмотки и магнитопровода трансформатора изменяют передаточную функцию обмотки. В результате сравнения новой измеренной передаточной функции с передаточной функцией нормального (соответствующего номинальным параметрам) состояния обмотки и магнитопровода позволяет выявить данные изменения. Анализируя эти различия с помощью метода FRA, определяется тип и степень неисправности. В литературе (стандарт IEEE C57.149TM–2012, ГОСТ Р 59239–2020) этот этап называется интерпретацией частотной характеристики. В материале данной статьи, в отличие от обычного FRA, авторы в качестве исходных данных предложили использовать импедансную и фазо-частотную характеристику сопротивления. При анализе передаточной функции различными авторами использовались методы, основанные на числовых показателях [3], непараметрических статистических показателях, бинарной морфологии и вариации экстремальных точек [4], оконном методе расчёта [5], методах моделирования трансформатора [6], методах

нечёткой логики [7], вероятностном нейросетевом анализе [8], а также полярные характеристики графика FRA наряду с цифровой обработкой изображений. Согласно ГОСТ 59239-2020, частотные характеристики могут быть разбиты на три частотных диапазона: в нижнем частотном диапазоне определяющее влияние оказывает магнитопровод, в среднем частотном диапазоне – взаимодействие между обмотками, в верхнем – конструкция измеряемой обмотки и внутренние соединения; также в области высоких частот влияние оказывают измерительные кабели.

Современные методы диагностики не всегда однозначно указывают на место и вид дефекта [9]. Программно-аппаратные комплексы диагностирования неисправностей для предприятий электроэнергетической отрасли компании Omicron, например *Testrano 600*, реализованы в одном устройстве для плановых проверок на месте эксплуатации и при заводских приёмочных испытаниях. Оборудование компании *Alstom Schorch Transformatoren* предоставляют сведения о состоянии трансформатора в режиме непрерывного контроля для силовых трёхфазных трансформаторов мощностью от 10 до 100 МВА и более. Компания *Siemens* поставляет систему непрерывного контроля состояния *Sitram+* второго поколения на базе вычислительной системы *Sitnatic*, получающей сигналы от датчиков, установленных на трансформаторе, производящей обработку, анализ и визуализацию данных измерений.

Несмотря на все безусловные достоинства применяемых в Республике Беларусь диагностических систем, они имеют ряд существенных недостатков: не являются универсальными (применяются под конкретные схемы, оборудование и др.); используется разнородная и разноточная информация; не учитывается динамика изменения критериев диагностирования оборудования, другими словами, системы не обучаемы. Поэтому применение самообучаемых систем на основе искусственных нейронных сетей позволит устранить перечисленные недостатки. При этом подготовка исходных данных для диагностических систем на основе экспериментальных исследований, например, при возникновении межвитковых замыканий (МКЗ) и других неисправностей представляет определенные практические

трудности, связанные, например, с большими величинами токов, которые могут повредить испытываемый трансформатор.

Оценка состояния обмотки требует определения параметров, по которым будет производиться анализ, а также выявления корреляции этих параметров с сопротивлением в месте дефекта, количеством короткозамкнутых витков, местоположением дефекта. Метод, позволяющий оценивать работоспособность трансформаторов в эксплуатационном периоде их работы, должен делать возможным выявление ослабления витковой изоляции. При замыкании любых медных проводников сопротивление в месте контакта не будет равно нулю из-за оксидных плёнок и, в зависимости от усилия прижима, может находиться в пределах от нескольких десятков долей ома до десятков ом. Кроме этого, витки могут замыкаться через разрушенную, а часто и обугленную изоляцию или через проводящие мостики, образованные локальными дефектами. В этом случае сопротивление может достигать 1000 Ом и более, т. е. значения, при котором трансформатор будет ещё достаточно работоспособен. Однако такие дефекты обмотки в процессе эксплуатации будут активно прогрессировать. Это связано с тем, что, когда сопротивление в месте дефекта станет соизмеримо с модулем комплексного сопротивления витка, наводимая в нём ЭДС будет вызывать дополнительное лавинообразное тепловое разрушение изоляции витка и спекание соседних витков вплоть до выгорания всей катушки. Всё это в итоге способствует скорейшему выходу трансформатора из строя [10].

Выбор контролируемых параметров и характеристик авторы основывали на анализе существующих нормативных требований при квалификационных, приёмо-сдаточных, периодических и типовых испытаниях и методах контроля, изложенных в ГОСТ Р 58115-2018, ГОСТ 21023-75, ГОСТ 16110-82, ГОСТ 3484.1-88.

В статье [11] представлена методика интерпретации частотных характеристик, основанная на обработке изображений и их анализе с помощью свёрточных нейронных сетей. Предложенная процедура переводит частотные характеристики в двумерные изображения с помощью техники визуализации. Точная локализация повреждений

выполняется с помощью свёрточной нейронной сети, а затем результаты анализируются с помощью метрик оценки производительности нейронной сети. Путём тестирования высокоомных повреждений в различных секциях моделируемой обмотки и пошагового применения предложенного метода в данном исследовании также осуществляется раннее обнаружение повреждений. Необходимо отметить, что в данном методе не используется фазо-частотная характеристика.

Использование фазо-частотной характеристики для диагностики трансформатора описано в статье [12]. Данный метод заключается в сравнении «фазовых портретов» трансформатора при различных технических состояниях. Однако данный метод не позволяет определить ни протяжённость повреждения, ни его тип, поэтому нуждается в дальнейшей доработке.

В работе [12] предложен метод диагностики межвитковых коротких замыканий, основанный на анализе с использованием свёрточных нейронных сетей отношений токов, напряжений, активных мощностей и коэффициентов мощностей. Данный метод имеет преимущество по сравнению с FRA в виде непрерывного онлайн-мониторинга работы трансформатора как в режиме холостого хода, так и в режиме работы под нагрузкой.

Используя измерители иммитанса (например, E7-30 или HM8118), можно непосредственно получить амплитудно-частотные (импедансные) $Z(\omega)$ и фазочастотные $\varphi(\omega)$ характеристики трансформаторов. При отсутствии таких приборов на практике можно использовать различные косвенные методы определения комплексных сопротивлений (или проводимостей) для каждой частотной составляющей сигнала с учетом их результирующей погрешности измерений.

Целью данной работы являлось выявление различных дефектов трансформатора с помощью анализа частотных характеристик.

Методика эксперимента

Для проведения частотного анализа использован метод трёх вольтметров. Схемы подключения задающего генератора сигналов и вольтметров для опытов холостого хода и короткого замыкания приведены на рисунке 1.

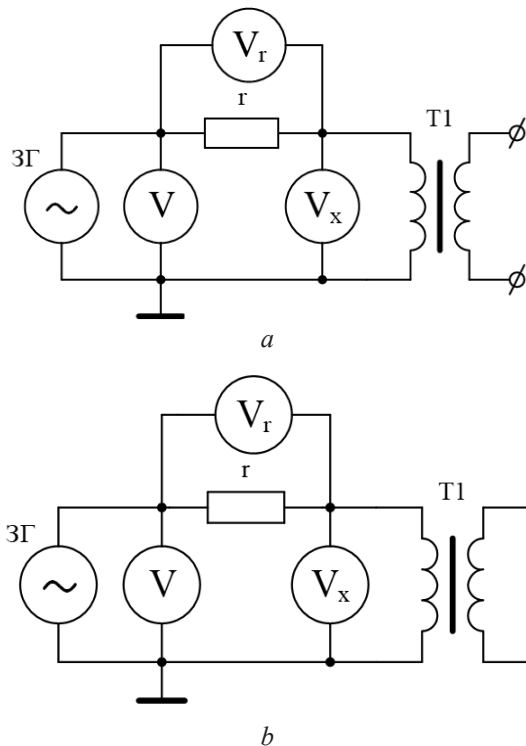


Рисунок 1 – Схемы подключения задающего генератора сигналов и вольтметров: *a* – для опыта холостого хода; *b* – для опыта короткого замыкания

Figure 1 – Wiring diagrams of the signal generator and voltmeters: *a* – for the noload experiment; *b* – for the short-circuit experiment

Для построения частотных характеристик, используются четыре мультиметра В7-68 (один используется как частотомер, другие – как вольтметры), задающий генератор сигналов ГЗ-112 и высокочастотный резистор r на 4,5 Ом. Вольтметр обеспечивает работу в составе автоматизированных информационно-измерительных систем с управлением от персонального компьютера или ноутбука. Режим измерения постоянного напряжения необходим для работы вольтметра с ВЧ-пробником.

С помощью магазина измерительных сопротивлений выполнялось изменение сопротивления в широких пределах от 0,1 Ом до 100 кОм для имитации различного состояния обмоток (МКЗ, МФЗ) и сердечника.

С целью проведения статистического анализа измеряемых величин импедансных и фазо-частотных характеристик выполнялись многократные измерения (для каждой из 100 фиксированных частот в диапазоне от 0 до 1 МГц проводилось по 30 измерений), на основании которых рассчитывались статистические

оценки параметров распределения случайных величин: среднее значение и оценка среднего квадратического отклонения. При этом выполнялось определение интервальных оценок математического ожидания и стандартного отклонения исследуемых результатов измерений с доверительной вероятностью 0,95 и проводилась проверка гипотезы о нормальном законе распределения. Отклонение результатов измерений относительно среднего значения для частот диапазона от 0 до 100 кГц не превысила 1 %.

При разработке универсальной диагностической системы необходимо учитывать не только данный фактор, но и разброс в значениях по каждой из фаз. Поэтому если исходное измерение частотных характеристик отдельных фаз исследуемого трансформатора отсутствует, то можно выполнить сравнение с частотной характеристикой, полученной на другом трансформаторе той же серии (изготовленном по тем же чертежам и тем же заводом-изготовителем). Следует отметить, из-за возможных отличий в конструкции обмоток даже в случае одного завода-изготовителя (например, модернизации серии), в том числе для однотипных трансформаторов, результаты экспериментов частотных характеристик могут отличаться. В некоторых случаях при диагностических мероприятиях на предприятиях можно допустить использование неповрежденной фазы для оценки состояния обмотки при условии, что длина магнитной цепи одинакова для рассматриваемых фаз.

Результаты исследования

На рисунке 2 представлены импедансные и фазо-частотные характеристики трёхфазного трансформатора ТМ-50/6 при МФЗ в режиме холостого хода для диапазона частот 0–100 кГц. Полученные изображения могут использоваться после нормировки в качестве исходных данных для искусственных нейронных сетей [14]. Особое внимание требуется уделить таким факторам в порядке их значимости, как форма фазовых характеристик, амплитуды резонансов, смещения резонансных частот и число резонансов, связав их с требуемой детализацией при классификации неисправностей.

Из рисунка 2 можно сделать следующие выводы:

– наиболее значимые изменения присущи первой резонансной области до достижения

частоты 30–50 кГц в зависимости от мощности трансформатора;

– амплитуда первой резонансной области импедансных характеристик снижается по мере уменьшения сопротивления до наступления полного МФЗ;

– фазо-частотные характеристики отличаются значимым изменением формы кривой и сдвигом частоты в большую сторону для первой резонансной области;

– характер изменения фазо-частотных характеристик отличается снижением фазы первой резонансной области до 5 кОм, а затем увеличением ёмкостной составляющей до нескольких ом при МКЗ.

Сравнительный частотный анализ МФЗ и МКЗ в опыте холостого хода для ТС-280Р (рисунок 3) и трёхфазного трансформатора ТМ-50/6 (рисунок 4) указывает в обоих случаях на следующие отличия:

– для МКЗ наблюдается значительный сдвиг первой резонансной частоты импедансной характеристики и снижение амплитуды первой резонансной области;

– форма фазо-частотных характеристик значительно отличается;

– для фазо-частотной характеристики регистрируется классификационный диапазон на частотах 75–90 кГц.

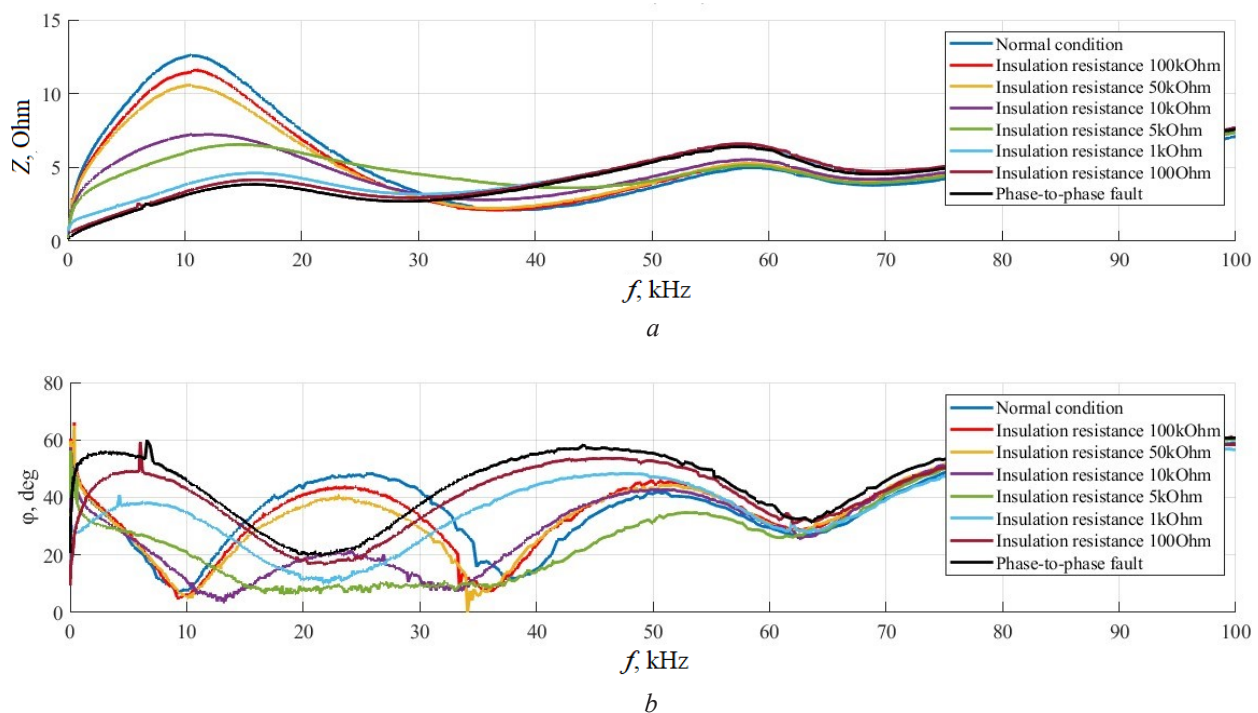
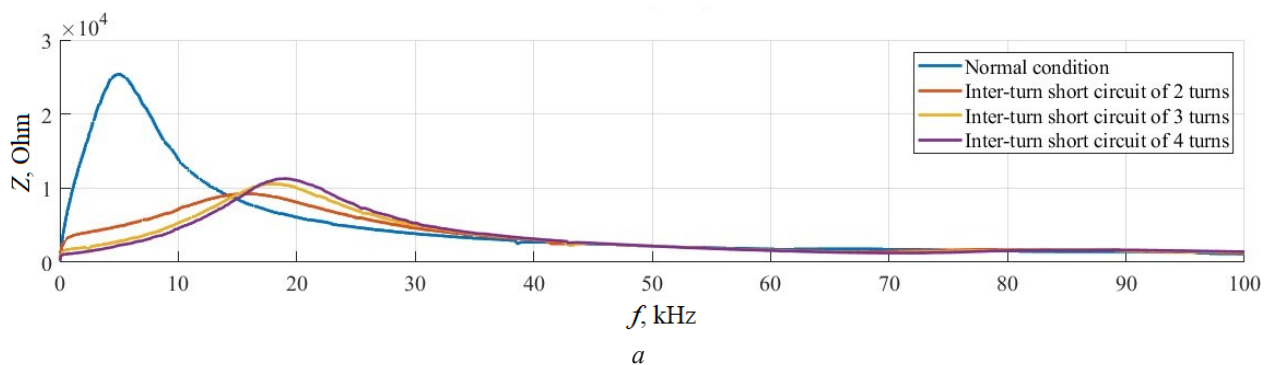


Рисунок 2 – Импедансные (a) и фазо-частотные (b) характеристики при межфазном замыкании

Figure 2 – Impedance (a) and phase-frequency (b) characteristics for phase-to-phase faults



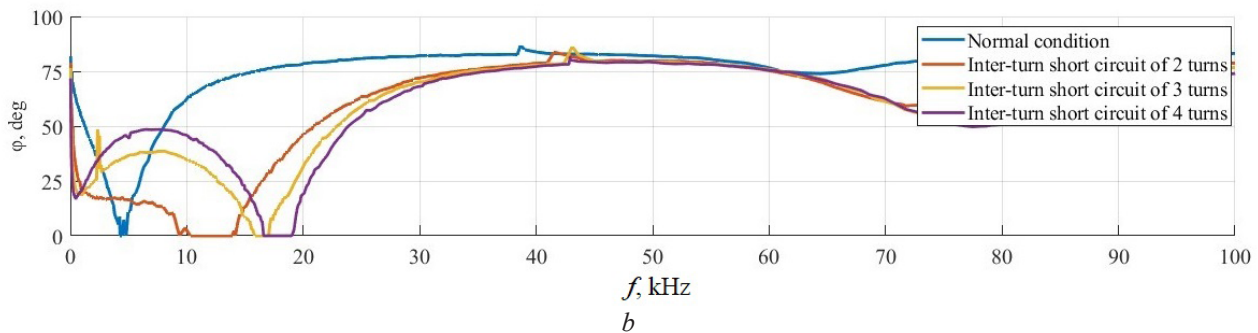


Рисунок 3 – Импедансные (a) и фазо-частотные (b) характеристики при межвитковом коротком замыкании трёхфазного трансформатора TC-280P для диапазона частот 0–100 кГц

Figure 3 – Impedance (a) and phase-frequency (b) characteristics at interturn short-circuit of three-phase transformer TS-280R for frequency range 0–100 kHz

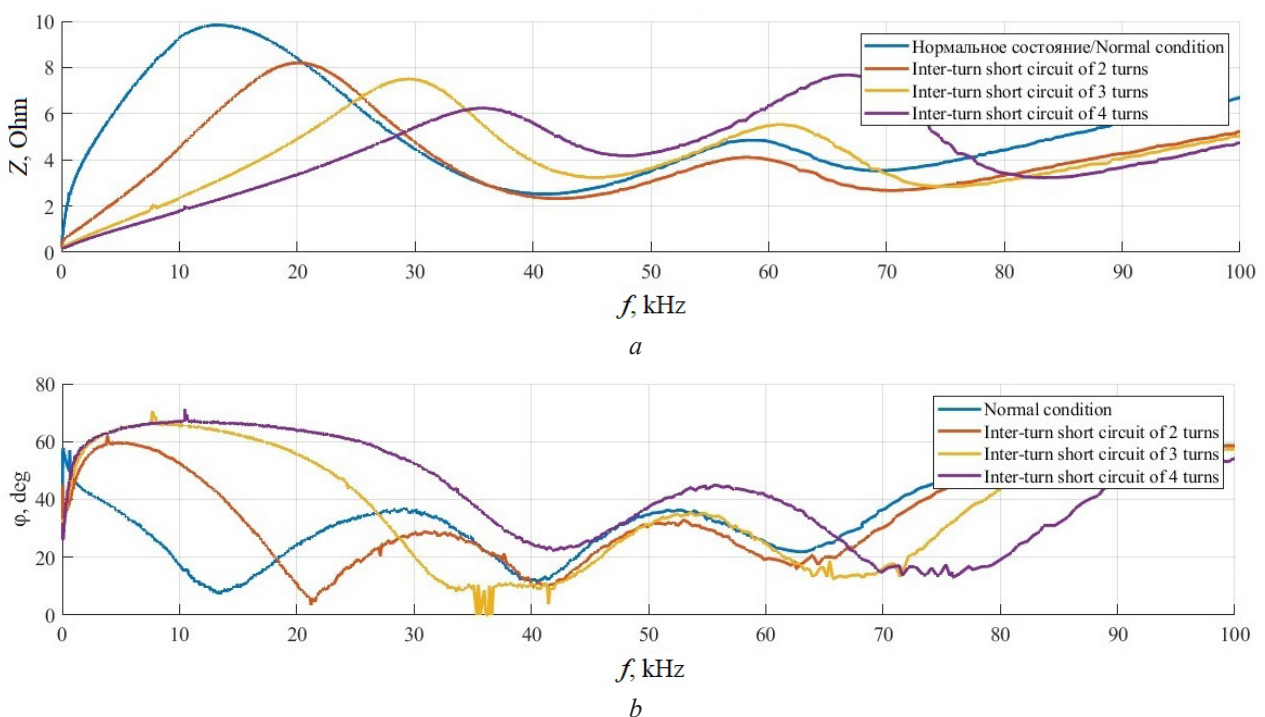


Рисунок 4 – Импедансные (a) и фазо-частотные (b) характеристики при межвитковом коротком замыкании трёхфазного трансформатора TM-50/6 для диапазона частот 0–100 кГц

Figure 4 – Impedance (a) and phase-frequency (b) characteristics at interturn short-circuit of three-phase transformer TM-50/6 for frequency range 0–100 kHz

Сравнительный частотный анализ МКЗ и повреждений сердечника трансформатора ОСМ-1,0 УЗ (рисунок 5) указывает на следующие отличия:

- для дефектов сердечника наблюдается увеличение амплитуды (в отличие от МКЗ и междуфазного МФЗ, где происходит снижение) и значительный сдвиг первой резонансной частоты импедансной характеристики;

- значительно изменяется форма фазо-частотных характеристик.

Для получения исходных данных, связан-

ных с дефектами сердечника, использовался трёхфазный трансформатор TM-50/6 на рисунке 6 представлены четыре следующих состояния:

- сердечник не повреждён (нормальное состояние);

- ослаблено болтовое соединение листов электротехнической стали сердечника (ослабленное состояние);

- с помощью текстолитовых клинов между пластинами создан воздушный зазор по верхнему яруму 4 мм;

- то же – 8 мм.

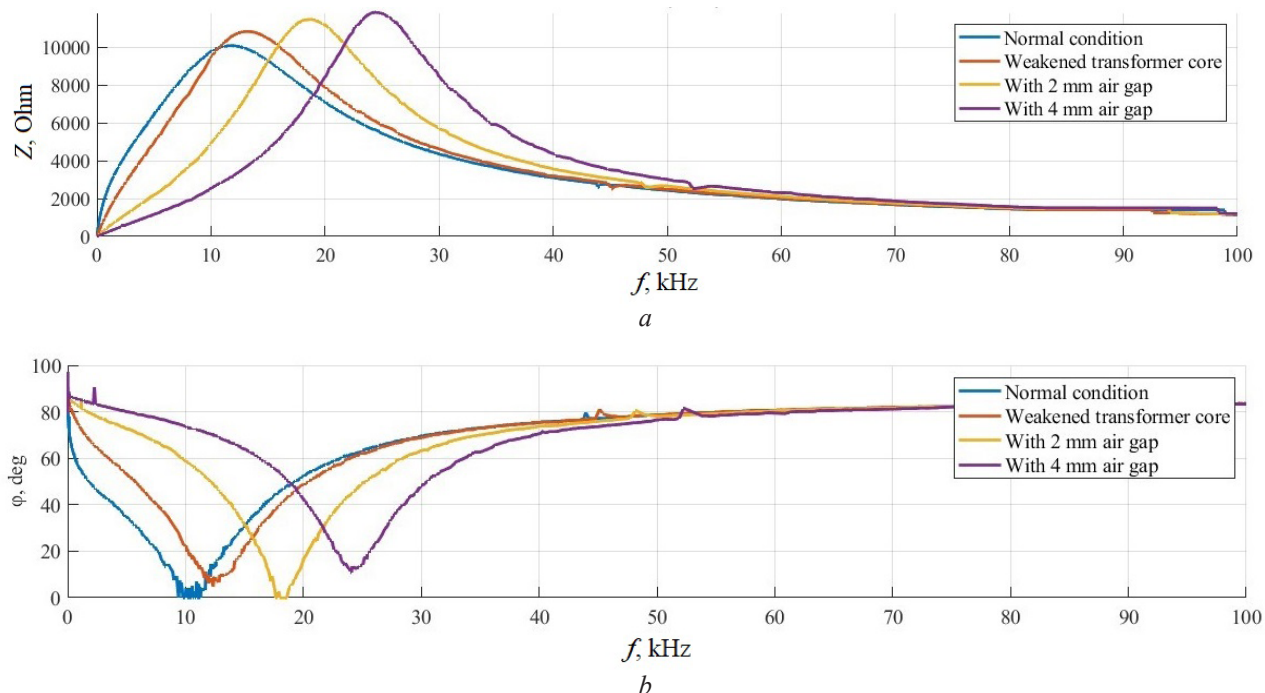


Рисунок 5 – Импедансная (а) и фазо-частотная (b) характеристики при обнаружении дефектов сердечника трансформатора

Figure 5 – Impedance (a) and phase-frequency (b) characteristics for transformer core defect detection

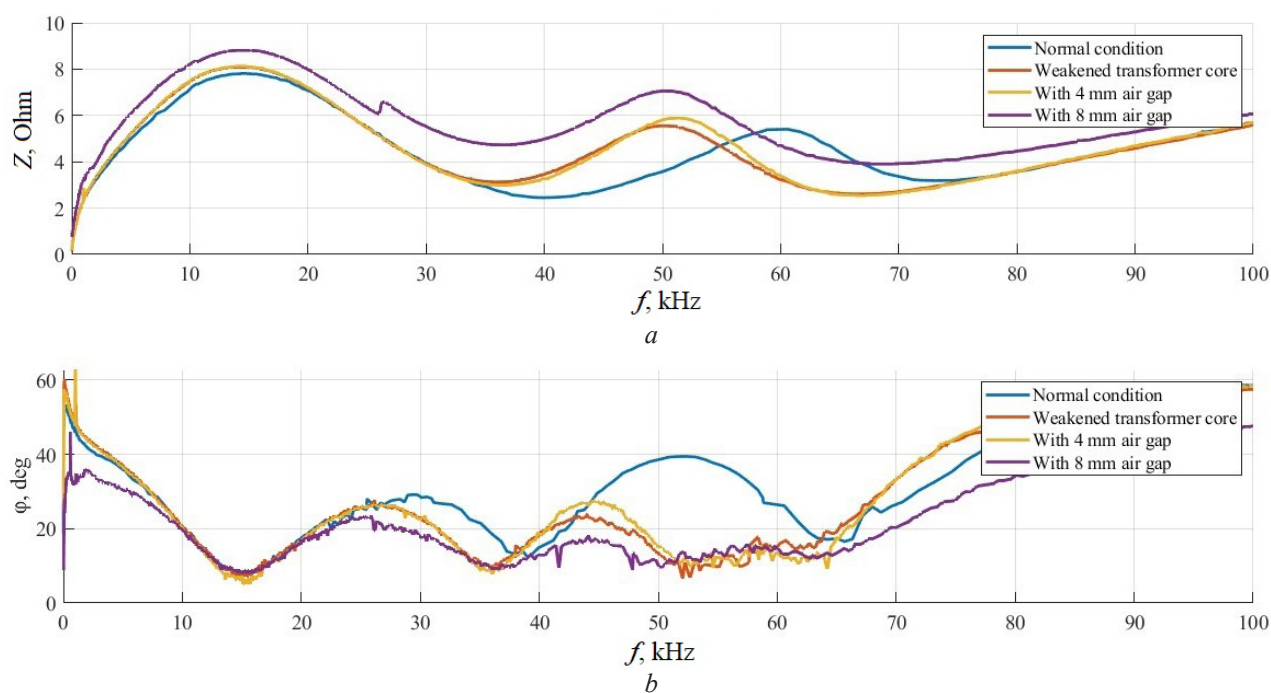


Рисунок 6 – Импедансная и фазо-частотная характеристики при дефектах магнитопровода для трёхфазного трансформатора ТМ-50/6: а – для обмотки, расположенной на краю стержневого магнитопровода; б – то же – по центру стержневого магнитопровода

Figure 6 – Impedance and phase-frequency characteristics at defects of magnetic core for three-phase transformer TM-50/6: а – for the winding located at the edge of the core magnetosheet; б – the same for the winding located in the centre of the core magnet core

При увеличении степени ослабления сердечника и при появлении воздушных зазоров увеличивается магнитное рассеяние обмоток, ЭДС рассеяния, на импедансной характеристике происходит смещение амплитуды второй резонансной частоты в сторону уменьшения и небольшое увеличение амплитуды первой резонансной частоты.

Заключение

На основании приведённых результатов авторы предлагают использовать частотные характеристики для обнаружения наиболее распространённых повреждений (межвитковые короткие замыкания, межфазные короткие замыкания, магнитопровод), а также предотказных состояний. Наибольшим изменениям подвержены следующие параметры частотных характеристик: амплитуда первой резонансной области импедансной характеристики и сдвиг его частоты; форма фазо-частотных характеристик. С целью классификации неисправностей следует обратить внимание на следующие отличительные черты частотных характеристик при возникновении различных неисправностей и их предотказных состояний:

- при межвитковых коротких замыканиях наблюдается значительный сдвиг первой резонансной частоты импедансной характеристики и снижение амплитуды первой резонансной области.

- при межфазных коротких замыканиях амплитуда первой резонансной области импедансных характеристик снижается по мере уменьшения сопротивления до наступления полного межфазного короткого замыкания;

- дефекты магнитопровода: смещение амплитуды второй резонансной частоты в сторону уменьшения (трёхфазные трансформаторы) и увеличение амплитуды первой резонансной частоты.

Полученные результаты в виде изображений нормализованных характеристик являются исходными данными для свёрточной нейронной сети, выходной слой которой не только позволяет определить вид дефекта, но и классифицировать указанные процессы в зависимости от назначения и количества классифицирующих нейронов выходного слоя.

Использование частотных характеристик однофазных и трёхфазных трансформаторов

при диагностировании предотказных состояний и отказов позволит создать универсальный программно-аппаратный комплекс диагностики для трансформаторов различных типов и номинальных данных. Результаты работы могут практически заинтересовать как энергетические предприятия Республики Беларусь (например, ГПО «Белэнерго», государственное объединение «Белорусская железная дорога», ОАО «МЭТЗ имени В.И. Козлова» и др.), так и других стран.

Список использованных источников / References

1. Mahmoudi N, Samimi MH, Mohseni H. Experiences with transformer diagnosis by DGA: case studies. IET Generation, Transmission & Distribution. 2019;13(23):5431-5439.

DOI: 10.1049/iet-gtd.2019.1056

2. Behjat V, Mahvi M, Rahimpour E. A new statistical approach to interpret power transformer frequency response analysis: Nonparametric statistical methods. 2015 30th International Power System Conference (PSC), Tehran, Iran. 2015;142-148.

DOI: 10.1109/IPSC.2015.7827740

3. Samimi MH, Tenbohlen S, Akmal AAS, Mohseni H. Evaluation of numerical indices for the assessment of transformer frequency response. IET Generation, Transmission & Distribution. 2017;11(1):218-227.

DOI: 10.1049/iet-gtd.2016.0879

4. Zhao Z, Yao C, Li C, Islam S. Detection of Power Transformer Winding Deformation Using Improved FRA Based on Binary Morphology and Extreme Point Variation. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2018;65(4):3509-3519.

DOI: 10.1109/TIE.2017.2752135

5. Tarimoradi H, Gharehpetian GB. Novel Calculation Method of Indices to Improve Classification of Transformer Winding Fault Type, Location, and Extent. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2017;13(4):1531-1540.

DOI: 10.1109/II.2017.2651954

6. Jahan MS, Keypour R, Izadfar HR, Keshavarzi MT. Locating power transformer fault based on sweep frequency response measurement by a novel multistage approach. IET Science, Measurement & Technology. 2018;12(8):949-957.

DOI: 10.1049/iet-smt.2018.0003

7. Contin A, Rabach G, Borghetto J, Nigris MD, Passaglia R, Rizzi G. Frequency-response analysis of power transformers by means of fuzzy tools. IEEE

Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2011;18(3):900-909.

DOI: 10.1109/TDEI.2011.5931079

8. Bigdeli M, Vakilian M, Rahimpour E. A probabilistic neural network classifier - based method for transformer winding fault identification through its transfer function measurement. International Transactions on Electrical Energy Systems. 2013;23(3):392-404.

DOI: 10.1002/etep.668

9. Гизатулин И.А. Построение системы диагностики и мониторинга силового трансформатора 110 КВ / Гизатулин И.А., Воркунов О.В. // Сборник научных статей по материалам XVI Международной научно-практической конференции (3 декабря 2024 г., г. Уфа). В 3 ч. Ч.1 / – Уфа: Изд. Научноиздательский центр Вестник науки, 2024. – С. 64–68.

9. Gizatulin IA, Vorkunov OV. Construction of the system of diagnostics and monitoring of 110 KV power transformer. Fundamental and applied approaches to solving scientific problems. Collection of scientific articles on the materials of XVI International Scientific and Practical Conference (December 3, 2024, Ufa), In 3 parts., Part.1, Ufa, Bulletin of Science. 2024;64-68.

10. Суходолов, Ю.В. Возможность определения дефектов в обмотках электрических машин частотными методами / Ю.В. Суходолов, А.В. Исаев, В.В. Зеленко, С.В. Сизиков // Метрология и приборостроение. – 2022. – Том 98. – № 3. – С. 10-17.

10. Sukhodolov YV, Isaev AV, Zelenko VV, Sizikov SV. Possibility of defects determination in electric machine windings by frequency methods. Metrology and instrumentation. 2022;98(3):10-17. (In Russ.).

11. Moradzadeh A, Moayyed H, Mohammadi-Ivatloo B, Gharehpetian GB, Aguiar AP. Turn-to-Turn Short Circuit Fault Localization in Transformer Winding via Image Processing and Deep Learning Method. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2022;18(7):4417-4426. **DOI:** 10.1109/TII.2021.3105932

12. Vosoughi A. and M. Hamed Samimi. Evaluation of the Image Processing Technique in Interpretation of Polar Plot Characteristics of Transformer Frequency Response. 2022 International Conference on Machine Vision and Image Processing (MVIP), Ahvaz, Iran, Islamic Republic of, 2022;1-6.

DOI: 10.1109/MVIP53647.2022.9738771

13. Hramyka I. Development of Software and Hardware for Identification of Interturn Short Circuit in Single-Phase Transformers. 2024 Third International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T), Raipur, India. 2024;241-246.

DOI: 10.1109/ICPC2T60072.2024.10474962

14. Galushko VN, Hramyka IL, Ermolenko DV. Development of methodological principles of diagnostics of transformers of the non-pulling railroad power supply system with the help of artificial neural networks. Monograph, Ministry of Transport and Communications of the Republic of Belarus, Homel, BSUT, 2025, 167 p.

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-168-174

Взаимосвязь оптимального значения частоты электростимуляции, величины максимума фазового сдвига и усилия, развиваемого мышцей

А.Н. Осипов¹, И.О. Хазановский², А.В. Пацев³, С.В. Пацев⁴

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220013, Беларусь

²ООО «Горнэлектроникс»,
ул. Козлова, 50 В, г. Минск 220088, Беларусь

³Республиканский центр медреабилитации и бальнеолечения,
ул. Макаёнка, 17, г. Минск 220114, Беларусь

⁴ООО «Клиника «Мерси»,
ул. Игнатенко, 8, г. Минск 220035, Беларусь

Поступила 27.02.2025

Принята к печати 06.05.2025

Важным моментом в процессе восстановительного лечения заболеваний нервно-мышечного аппарата является электростимуляция. Выбор частотно-временных параметров сигнала и его согласование с электрическими параметрами биологических тканей является одним из основных факторов в практике электростимуляции. Целью данной работы являлась оптимизация параметров электрического воздействия в соответствии с функциональным состоянием мышц. Исследования проводились на двуглавой мышце плеча верхней конечности испытуемого и включали исследование зависимости усилия, развиваемого мышцей, от амплитуды напряжения стимулирующего сигнала и исследование фазочастотной характеристики межэлектродного импеданса двуглавой мышцы плеча верхней конечности испытуемых. Определена взаимосвязь оптимального значения частоты электростимуляции, вызывающей максимальное усилие мышцы, и величины фазового сдвига фазочастотной характеристики тканей. Изучена зависимость усилия, развиваемого мышцей при электростимуляции, от величины амплитуды стимулирующего сигнала при различных значениях частоты электростимуляции. Установлено, что при увеличении амплитуды стимулирующего сигнала увеличивается частота экстремума фазочастотной характеристики биоткани, а соответственно и увеличивается частота электростимуляции, вызывающая максимальное усилие мышц. Результаты работы могут быть использованы при проектировании систем электростимуляции опорно-двигательного аппарата с обратной связью.

Ключевые слова: частота электростимуляции, амплитуда стимулирующего сигнала, величина фазового сдвига, фазочастотная характеристика биоткани

Адрес для переписки:

Хазановский И.О.
ООО «Горнэлектроникс»,
ул. Козлова, 50 В, г. Минск 220088, Беларусь
e-mail: khaz_igor@yahoo.com

Address for correspondence:

Khazanovsky I.O.
Gornelektronics LLC,
Kozlova str. 50 B, Minsk 220088, Belarus,
e-mail: khaz_igor@yahoo.com

Для цитирования:

А.Н. Осипов, И.О. Хазановский, А.В. Пацев, С.В. Пацев.
Взаимосвязь оптимального значения частоты электростимуляции,
величины максимума фазового сдвига и усилия, развиваемого
мышцей.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 2. С. 168–174.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-168-174

For citation:

Osipov AN, Khazanovsky IO, Pacev AV, Pacev SV.
Relationship between the Electrical Stimulation Frequency Optimal
Value of the and the Magnitude of the Maximum Phase Shift,
and the Force Developed by the Muscle.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(2):168–174. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-168-174

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-168-174

Relationship between the Electrical Stimulation Frequency Optimal Value and the Magnitude of the Maximum Phase Shift, and the Force Developed by the Muscle

A.N. Osipov¹, I.O. Khazanovsky², A.V. Paceev³, S.V. Paceev⁴

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
P. Brovki str., 6, Minsk 220013, Belarus

²Gornelektronics LLC,
Kozlova str. 50 B, Minsk 220088, Belarus,

³Republican Center for Medical Rehabilitation and Balneotherapy,
Makayonka str., 17, Minsk 220114, Belarus,

⁴"Clinic "Mercy" LLC,
Ignatenko str., 8, Minsk 220035, Belarus

Received 27.02.2025

Accepted for publication 06.05.2025

Abstract

Electrical stimulation restorative treatment's process of neuromuscular system's diseases very important. Choice of the signal frequency-time parameters and its coordination with the biological tissues electrical parameters one of the main factors in the practice of electrical stimulation. The purpose of this article was to optimize the electrical action parameters in accordance with the muscles's functional state. The studies were conducted on the biceps brachii of the upper limb of the subject and included: study of dependence of the effort developed by the muscle on the amplitude of the stimulating signal's voltage and study of the interelectrode impedance phase-frequency characteristic of the upper limb biceps brachii of the subjects. As a result, relationship between the optimal value of the electrical stimulation frequency causing the maximum effort of the muscle and the magnitude of the phase shift of the phase-frequency characteristic of the tissues was determined. Dependence of the effort developed by the muscle during electrical stimulation on the amplitude of the stimulating signal magnitude at different values of electrical stimulation frequency was studied. It was established that with an increase of the stimulating signal amplitude, frequency of the phase-frequency characteristic's extremum of the biotissue increases and accordingly the frequency of electrical stimulation that causes maximum muscle effort increases. Results of the work can be used in the design of electrical stimulation systems for musculoskeletal system with feedback.

Keywords: electrical stimulation frequency, stimulation signal amplitude, phase shift magnitude, phase-frequency characteristic of biological tissue

Адрес для переписки:

Хазановский И.О.
ООО «Горнэлектроникс»,
ул. Козлова, 50 В, г. Минск 220088, Беларусь
e-mail: khaz_igor@yahoo.com

Address for correspondence:

Khazanovsky I.O.
Gornelektronics LLC,
Kozlova str. 50 B, Minsk 220088, Belarus,
e-mail: khaz_igor@yahoo.com

Для цитирования:

А.Н. Осипов, И.О. Хазановский, А.В. Пачеев, С.В. Пачеев.
Взаимосвязь оптимального значения частоты электростимуляции,
величины максимума фазового сдвига и усилия, развиваемого
мышцей.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 2. С. 168–174.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-168-174

For citation:

Osipov AN, Khazanovsky IO, Paceev AV, Paceev SV.
Relationship between the Electrical Stimulation Frequency Optimal
Value of the and the Magnitude of the Maximum Phase Shift,
and the Force Developed by the Muscle.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(2):168–174. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-168-174

Введение

Важное значение в ходе восстановительного лечения повреждений и заболеваний нервно-мышечной системы, вызывающих ограничения в движении в связи со снижением силы мышц и их дальнейшей гипотрофии, имеет электростимуляция [1, 2]. Традиционные методы электростимуляции токами различной формы (диадинамические, синусоидальные, модулированные и др.) не решают задачу реабилитации в целом. Одним из вариантов решения данной проблемы является применение систем электростимуляции с обратной связью. Суть данного решения заключается в сочетании некоторых компонентов лечебной и диагностической аппаратуры, позволяющих в режиме реального времени в ходе электростимуляции осуществлять контроль отдельных физиологических параметров, на основе которых вырабатывается соответствующее терапевтическое воздействие [3]. Важным аспектом является выбор параметров стимулирующего воздействия (частота, форма, амплитуда, длительность воздействия и др.), которое должно осуществляться в соответствии с функциональным состоянием мышц, а также с его изменением в процессе проведения электростимуляции и реализовывать избирательное воздействие на отдельные участки мышцы [4]. В [5, 6, 7] отмечается, что дальнейшее развитие в данной области должно быть направлено на оптимизацию параметров стимуляции, согласованных с физиологическими и электрическими характеристиками стимулируемых тканей. Так, в работах [8, 9, 10] приведены результаты исследований влияния ширины и амплитуды стимулирующих импульсов на эффективность лечения различных заболеваний, показано, что частотно-временные параметры стимулирующих сигналов существенно влияют на область их эффективного применения. Таким образом, выбор частотно-временных параметров сигнала и его согласование с электрическими параметрами биологических тканей является одним из основных в практике электростимуляции.

Однако основная задача оптимизации электрического воздействия состоит не только в выявлении зависимостей функционального состояния организма и его реакций от различных параметров воздействующего фактора,

но и в реализации на их основе алгоритмов управления параметрами воздействия. Известны результаты исследований [11], в которых представлена математическая модель реакции нейронных структур в ответ на электростимуляцию (ЭС) и показана возможность определения оптимальных параметров ЭС, впоследствии реализованных в медицинской аппаратуре транскраниальной электростимуляции. В работе [12] представлена методика нахождения оптимальной по энергетическому критерию частоты электростимуляции, основанная на анализе импедансных параметров стимулируемой ткани. Представлены исследования взаимосвязи фазочастотной характеристики и оптимальной по энергетическому критерию частоты несущей стимулирующего сигнала. В результате установлена связь между оптимальной несущей частотой сигнала и частотой минимума фазочастотной характеристики ФЧХ (общее сопротивление тканей). Оптимальная частота больше частоты минимума ФЧХ в $2,86 \pm 0,65$ раза. Известны результаты исследований взаимосвязи между силой, развиваемой мышцей, и полосой преобладающих частот и средней частотой, возбуждающих её электрических потенциалов. На основании полученной зависимости предложен метод синтеза сигналов электростимуляции [4].

Тем не менее научно обоснованная технология оптимизации параметров воздействия в соответствии с текущими характеристиками биообъекта является перспективным направлением создания медицинской техники и требует дальнейшего развития. В связи с этим в данной статье исследуются вопросы управления усилием мышечных групп, вызываемым ЭС, посредством изменения амплитуды и частоты стимула на основе ФЧХ биотканей.

Модель и алгоритм исследования

Исследования проводились с помощью экспериментального комплекса, модель которого представлена на рисунке 1.

В ходе исследований испытуемый располагался в положении сидя, верхняя конечность согнута в локтевом суставе и лежит на горизонтальной поверхности, кисть расположена вне опорной плоскости. К кисти испытуемого закреплён динамометр, который ответной частью зафиксирован на поверхности пола.

Исследования проводились на двуглавой мышце плеча верхней конечности испытуемого. Стимулирующий ток подавался через электроды, наложенные на двигательную точку мышцы.

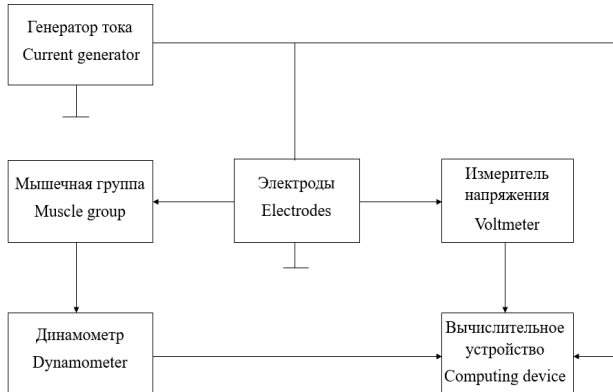


Рисунок 1 – Стенд для проведения исследований

Figure 1 – Research stand

На первом этапе выполнено исследование зависимости усилия, развиваемого мышцей, от амплитуды напряжения стимулирующего сигнала. Процедура ЭС проводилась путём воздействия на мышцу сгенерированным сигналом, подаваемым на электроды. Напряжение изменялось в диапазоне от 60 В до значения,

при котором измеряемое усилие мышцы, вызванное ЭС, не возрастало. При проведении исследований пороговое значение амплитуды напряжения не превышало 90 В. Форма сигнала стимула соответствовала синусоидальной, а частота электростимуляции F – 0,5 кГц, 0,8 кГц, 2,5 кГц, 3,5 кГц, 5 кГц.

На втором этапе проведены исследования ФЧХ межэлектродного импеданса двуглавой мышцы плеча верхней конечности испытуемых. Регистрация ФЧХ выполнялась в соответствии со следующим алгоритмом. Сигнал тока синусоидальной формы подавался на электроды, с этих же электродов фиксировался сигнал напряжения. Сигналы напряжения и тока синхронно через двухканальный АЦП поступали в персональный компьютер. Фаза между током и напряжением вычислялась при переходе измеренных сигналов через нулевое значение. Для построения ФЧХ задающий сигнал изменялся от 20 Гц до 20 кГц. Амплитудное значение тока составляло 2 мА.

Результаты исследования

Зависимости усилия, развиваемого мышцей от амплитуды напряжения стимулирующего сигнала представлены на рисунке 2.

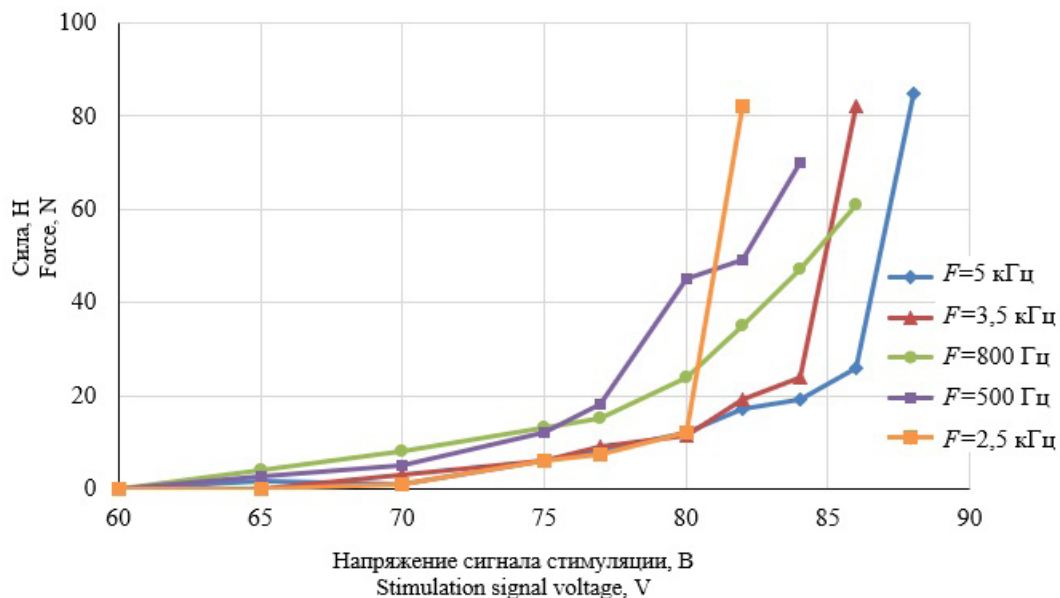


Рисунок 2 – Зависимость развиваемого мышцей усилия от величины амплитуды стимулирующего сигнала при различных значениях частоты электростимуляции F

Figure 2 – Dependence of the effort developed by the muscle on the amplitude of the stimulating signal at different values of the frequency of electrical stimulation F

Как видно из рисунка 2 зависимости носят экспоненциальный характер. Однако следует отметить, что в диапазоне сигналов до 75 В зависимости имеют линейную структуру. Это диапазон соответствует диапазону, используемому, как правило, в практической миоэлектростимуляции (менее 80 % от порогового значения напряжения). Диапазон свыше 75 В характеризуется высокой степенью нелинейности. Как следует из рисунка максимальное усилие, развиваемое мышцей, зависит не только от напряжения сигнала, но и от частоты стимуляции. Так, при амплитуде напряжения 77 В максимальное усилие получено на частоте 500 Гц, а при амплитуде напряжения 82 В – на частоте 2,5 кГц.

На рисунке 3 представлены результаты максимальных значений усилий мышцы для исследуемых частот.

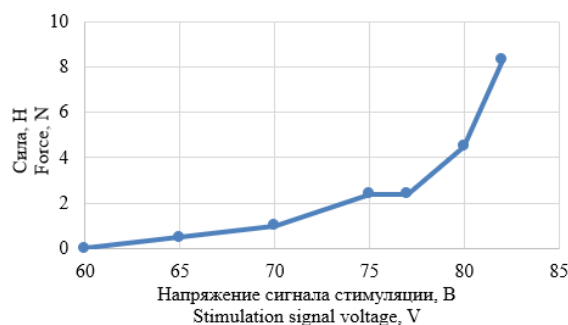


Рисунок 3 – Зависимость максимального значения мышечного усилия от величины напряжения электростимуляции

Figure 3 – Dependence of the maximum value of muscle effort on the magnitude of electrical stimulation voltage

Как видно из рисунка 3 зависимость имеет линейный характер в основном диапазоне электростимуляции, что показано на рисунке пунктирной линией.

Таким образом, при ЭС опорно-двигательного аппарата изменение мышечного усилия может быть достигнуто не только посредством изменения амплитуды стимулирующего сигнала, но и за счёт изменения значения его частоты.

На рисунке 4 приведены зависимости, позволяющие определить наилучшую частоту стимула, соответствующую амплитуде напряжения стимуляции. Наилучшей считается частота, при которой усилие, развиваемое мышцей, является максимальным для данной амплитуды напряжения.

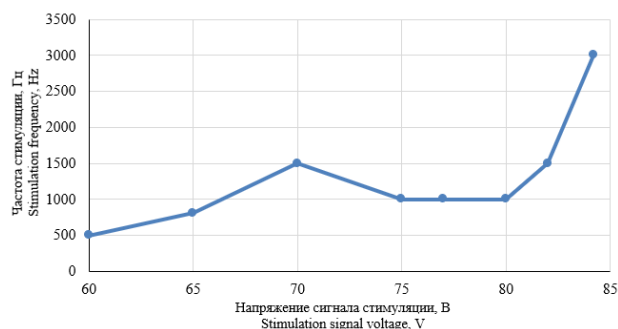


Рисунок 4 – Зависимость значения наилучшей частоты электростимуляции от амплитуды стимулирующего сигнала

Figure 4 – Dependence of the value of the best electrical stimulation frequency on the amplitude of the stimulating signal

Известно, что ФЧХ биотканей имеют экстремум [1, 2]. Причём значение частоты экстремума зависит от значения тока, при котором проводились исследования. В результате проведённых исследований установлено, что зависимость частоты максимума (экстремума) ФЧХ биоткани от уровня стимулирующего сигнала (рисунок 5) имеет характер, аналогичный зависимости наилучшей частоты электростимуляции от амплитуды стимулирующего сигнала (практически совпадает, рисунок 4).

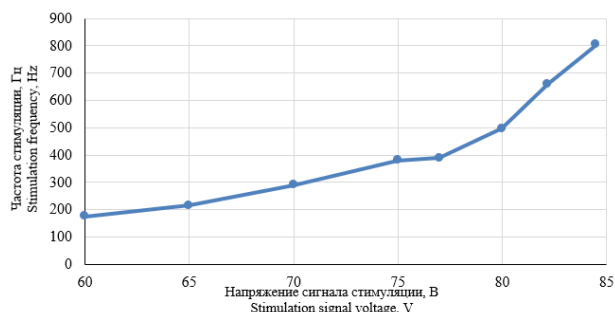


Рисунок 5 – Зависимость частоты максимума фазо-частотной характеристики биоткани от величины стимулирующего сигнала

Figure 5 – Dependence of the frequency of the maximum phase-frequency characteristic of biological tissue on the magnitude of the stimulating signal

На основании сравнения характеристик, представленных на рисунках 4 и 5, построена зависимость наилучшей частоты электростимуляции от частоты, соответствующей экстремуму ФЧХ биоткани (рисунок 6). Измерение ФЧХ является простой технической задачей, не требует длительного времени и может быть осуществлено перед процедурой

электростимуляции. Таким образом, данная характеристика может быть использована для управления частотой ЭС при подаче изменяемого по амплитуде стимулирующего сигнала.

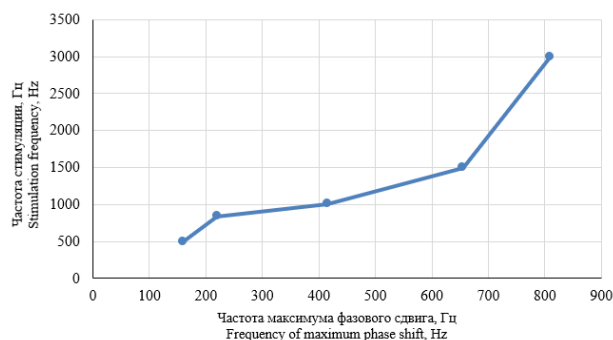


Рисунок 6 – Зависимость значений наилучшей частоты электростимуляции от частоты, соответствующей экстремуму фазочастотной характеристики биоткани

Figure 6 – Dependence of the values of the best frequency of electrical stimulation on the frequency corresponding to the maximum of the phase-frequency characteristic of biological tissue

Как видно из рисунка 6, наблюдается линейная зависимость между наилучшей частотой электростимуляции, соответствующей экстремуму ФЧХ биоткани, и частотой электростимуляции, соответствующей максимуму развиваемого мышцей усилия.

Заключение

Установлено, что при увеличении амплитуды стимулирующего сигнала увеличивается частота сигнала, соответствующая максимально развиваемому усилию. Аналогично при росте амплитуды стимулирующего сигнала растёт частота, соответствующая максимуму (экстремуму) фазочастотной характеристики стимулируемых мышечных групп. Для порогового режима электростимуляции частота экстремума фазочастотной характеристики биоткани составляет не более 25 % от наилучшей частоты стимулирующего сигнала. В связи с этим, в случае симуляции движения конечностей посредством стимуляции опорно-двигательного аппарата изменение усилия мышечных групп должно обеспечиваться не только изменением амплитуды сигнала стимуляции, но и изменением его частоты. Изменение частоты стимуляции осуществляется на основа-

нии зависимости изменения частоты экстремума фазочастотной характеристики от амплитуды сигнала, при котором проводились измерения. Данный результат может быть использован при проектировании систем электростимуляции опорно-двигательного аппарата.

Список использованных источников

1. Гурьянова У.А. Функциональная электростимуляция при восстановлении ходьбы после инсульта. / У.А. Гурьянова, В.В. Ковальчук, О.А. Тихоплав, Ф.Г. Литвак // Обзор литературы. Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация. – 2020. – Т. 2. – № 3. – С. 244-262.
DOI: 10/36425/rehab34831
2. Moineau B., Marquez-Chin C., Alizadeh-Meghraz M., [et al.] Garments for functional electrical stimulation: design and proofs of concept. J. Rehabil. Assist. Technol. Eng. 2019,6:205566831985434.
DOI: 10.1177/2055668319854340
3. Вовк М.И. Биотехнические системы управления двигательными функциями человека. / М.И. Вовк // Кибернетика и вычислительная техника. Киев. – 2017. – Т. 187. – № 1. – С. 49-66.
4. Осипов А.Н. Синтез сигналов электро-стимуляции на основе частотно-временного анализа электромиограмм. / А.Н. Осипов, И.О. Хазановский, Д.А. Котов, П.И. Балтрукович // Проблемы физики, математики и техники. Гомель. – 2022. – Т. 50. – № 1. – С. 33-36.
5. Голдырев Е.О., Функциональная электростимуляция в комбинации с фармакотерапией в нейрореабилитации при церебральных ишемиях и болевых синдромах. / Е.О. Голдырев, Л.Р. Ахмадеева, Э.М. Харисова // Эффективная фармакотерапия. – 2024. – Т. 20. – № 34. – С. 44–49.
DOI: 10.33978/2307-3586-2024-20-34-44-49
6. Jovanovic L.I., Kapadia N., Zivanovic V. [et al.] Brain-computer interface-triggered functional electrical stimulation therapy for rehabilitation of reaching and grasping after spinal cord injury: a feasibility study. Spinal Cord Series and Cases. 2021;7(24).
DOI: 10.1038/s41394-020-00380-4
7. Osuagwu B.C.A., Wallace L., Fraser M., [et al.] Rehabilitation of hand in subacute tetraplegic patients based on brain computer interface and functional electrical stimulation: a randomized pilot study. Journal of Neural Engineering. 2016;13(6):065002.
DOI: 10.1088/1741-2560/13/6/065002
8. Arpin DJ, Ugiliweneza B, Forrest G, Harkema SJ and Rejc E (2019) Optimizing Neuromuscular Electrical Stimulation Pulse Width and Amplitude to Promote

Central Activation in Individuals With Severe Spinal Cord Injury. *Front. Physiol.* 10:1310.

DOI: 10.3389/fphys.2019.01310

9. Глушук С.Ф. Адаптивные электростимуляторы желудочно-кишечного тракта / С.Ф. Глушук, Я.С. Пеккер // Известия томского политехнического университета. – Т. 308. – № 4. – С. 164–166.

10. Arpin D.J., Forrest G., Harkema S.J., Rejc E. (2018). Submaximal marker for investigating peak muscle torque using neuromuscular electrical stimulation after paralysis. *J. Neurotrauma.* 36,930–936.

DOI: 10.1089/neu.2018.5848

11. Малыгин А.В. Определение оптимальных параметров транскраниальной электростимуляции на основе математической модели нейронных структур. / А.В. Малыгин // Медицинские компьютерные технологии. – 2009. – № 5. – С. 25–32.

12. Электронная аппаратура для стимуляции органов и тканей / Под редакцией Р.И. Утямышева и М. Враны – М.: Энергоатомиздат, 2000. – С. 384.

References

1. Guryanova UA, Kovalchuk VV, Tikhoplav OA, Litvak FG. Functional electrical stimulation in gait recovery after stroke. Literature review. *Physical and rehabilitation medicine, medical rehabilitation.* 2020;2(3):244-262.

DOI: 10/36425/rehab34831

2. Moineau B, Marquez-Chin C, Alizadeh-Meghbrazi M. [et al.] Garments for functional electrical stimulation: design and proofs of concept. *J. Rehabil. Assist. Technol. Eng.* 2019;6:205566831985434.

DOI: 10.1177/2055668319854340

3. Vovk MI. Biotechnical systems for controlling human motor functions. *Cybernetics and computing engineering.* Kyiv. 2017;1(187):49-66.

4. Osipov AN, Khazanovsky IO, Kotov DA, Baltrukovich PI. Synthesis of electrical stimulation signals based on time-frequency analysis of electromyograms.

Problems of Physics, Mathematics and Technology. Gomel. 2022;1(50):33-36.

5. Goldyrev EO, Akhmadeeva LR, Kharisova EM. Functional electrical stimulation in combination with pharmacotherapy in neurorehabilitation of cerebral ischemia and pain syndromes. *Effective pharmacotherapy.* 2024;20(34):44-49.

DOI: 10.33978/2307-3586-2024-20-34-44-49

6. Jovanovic LI, Kapadia N, Zivanovic V. [et al.] Brain-computer interface-triggered functional electrical stimulation therapy for rehabilitation of reaching and grasping after spinal cord injury: a feasibility study. *Spinal Cord Series and Cases.* 2021;7(24).

DOI: 10.1038/s41394-020-00380-4

7. Osuagwu BCA, Wallace L, Fraser M. [et al.] Rehabilitation of hand in subacute tetraplegic patients based on brain computer interface and functional electrical stimulation: a randomized pilot study. *Journal of Neural Engineering.* 2016;13(6):065002.

DOI: 10.1088/1741-2560/13/6/065002

8. Arpin DJ, Ugiliweneza B, Forrest G, Harkema SJ and Rejc E. Optimizing Neuromuscular Electrical Stimulation Pulse Width and Amplitude to Promote Central Activation in Individuals With Severe Spinal Cord Injury. *Front. Physiol.* 2019;10:1310. **DOI:** 10.3389/fphys.2019.01310

9. Glushchuk SF, Pekker YaS. Adaptive electrical stimulators of the gastrointestinal tract. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University.* 308(4):164-166.

10. Arpin DJ, Forrest G, Harkema SJ, and Rejc E. Submaximal marker for investigating peak muscle torque using neuromuscular electrical stimulation after paralysis. *J. Neurotrauma.* 2018;36,930-936.

DOI: 10.1089/neu.2018.5848

11. Malygin AV. Determination of optimal parameters of transcranial electrical stimulation based on a mathematical model of neural structures, *Medical Computer Technologies,* 2009;5:25-32.

12. Electronic equipment for stimulation of organs and tissues / Edited by R.I. Utyamyshev and M. Vrana. Moscow: Energoatomizdat. 2000, p. 384.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Статьи, направленные в редакцию журнала, должны удовлетворять требованиям «Инструкции о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации)...», утвержденной Постановлением ВАК РФ от 28.02.2014 г. № 3

1. Материал статьи должен соответствовать профилю журнала и излагаться предельно ясно.

2. Статья представляется на русском или английском языке и публикуется на языке представления.

3. Поступившие в редакцию статьи проходят двойное полуслепое рецензирование. Основные критерии целесообразности опубликования – актуальность тематики, информативность, научная новизна.

4. Статья представляется в распечатанном и в электронном виде в формате текстового редактора Word for Windows, набор – сплошным текстом (без деления на колонки). Объём статьи не должен превышать 14 страниц, включая текст (шрифт Times New Roman, размер 12 п., интервал 1,5), таблицы, графический материал, всю необходимую информацию на английском языке.

5. На первой странице статьи указываются: название статьи, фамилии авторов (фамилия автора, с которым следует вести переписку, отмечается звёздочкой и указывается его адрес электронной почты), названия и почтовые адреса организаций (улица, номер дома, индекс, город, страна), в которых работают авторы, на русском и английском языках. Статья включает: аннотацию (в пределах 200–250 слов); ключевые слова (не более 5); введение, в котором делается краткий обзор сделанного в мире и конкретно формулируется цель работы; основную часть; заключение, в котором в сжатом виде сформулированы основные полученные результаты с указанием их новизны, преимуществ и возможностей применения; список использованных источников. Аннотация, ключевые слова, список использованных источников представляются на русском и английском языках.

6. Аннотация должна быть информативной (содержать «выжимку» из всех разделов статьи – введения с указанием цели работы, методики, основной части и заключения).

7. Графический материал должен быть контрастным и чётким. Необходимо придерживаться единообразия техники исполнения однотипных иллюстраций. Рисунок должен располагаться после абзаца, содержащего ссылку на него. Не допускается размещение рисунков в конце подраздела и статьи. Изобразительный материал вставляется в текст статьи, а также даётся в виде отдельных файлов (**формат tif, jpg, разрешение не менее 300 dpi**). Текст на рисунках набирается основной гарнитурой; размер кегля соизмерим с размером рисунка (желательно 8 пунктов). Все рисунки нумеруются и сопровождаются подрисуночными подписями. Фрагменты рисунка обозначаются

строчными курсивными латинскими буквами – «a», «b» и т. д. Надписи на рисунках и подписи к рисункам даются на русском и английском языках. Все сокращения и обозначения должны быть расшифрованы в подрисуночной подписи. Рисунки желательно предоставлять в цвете. На рисунках должны быть указаны оси с обозначением приводимых величин и масштабов. На графиках не нужно давать координатную сетку, если это не осциллограмма. Во всех случаях на рисунках должен быть приведён масштаб.

8. У графиков, имеющих числовые значения по осям, рамки должны быть открыты, а засечки направлены внутрь рамки. На рисунках, представляющих собой графики зависимостей, не следует делать размерную сетку, следует дать лишь засечки на осях, причем все засечки должны быть оцифрованы. Если оси на рисунках оцифрованы, то они завершаются на позиции очередной засечки, где засечка не ставится, а вместо числовых значений даются обозначения переменной и единица измерения. Если оси не оцифровываются, то они завершаются стрелками, рядом с которыми даются обозначения переменных без единиц измерения.

9. Полутонные фотографии приборов или их частей представляются при публикации в тех случаях, когда они несут существенную информацию, которую нельзя выразить иным способом. Фотографии должны быть высококачественными, контрастными, с хорошо различимыми деталями.

10. Иллюстрации (графики, диаграммы, схемы, чертежи), рисованные средствами MS Office, должны быть контрастными и чёткими. Недопустимо нанесение средствами MS Word каких-либо элементов поверх вставленного в файл рукописи рисунка (стрелки, подписи) ввиду большого риска их потери на этапах редактирования и вёрстки. Иллюстрации должны иметь размеры, соответствующие их информативности: 8–8,5 см (на одну колонку), 17–17,5 см (на две колонки) или 23 см (во весь лист). Поэтому желательно изображать отдельные элементы и надписи на рисунке так, чтобы при уменьшении масштаба рисунка до одного из указанных размеров буквы и цифры приобрели высоту 2–2,5 мм, элементы схем 3–5 мм, отдельные точки 1 мм, а линии должны быть при этом разнесены на расстояние не менее 0,5–1 мм.

11. Надписи и обозначения на иллюстрациях следует располагать так, чтобы они не соприкасались ни с какими её частями. На задний план иллюстрации желательно не добавлять серый (цветной) фон или сетки.

12. Таблицы не должны дублировать графики. Каждая таблица имеет заголовок. На все таблицы

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

и рисунки следует давать ссылки в тексте. Таблицы не должны содержать вертикальные линии, делящие таблицу на столбцы. Название и содержание таблиц представляется на русском и английском языках.

13. Обозначения и сокращения, принятые в статье, расшифровываются непосредственно в тексте.

14. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

15. Набор формул должен проводиться в редакторе MathType целиком. Набор формул из составных элементов не допускается, номера формул – по правому краю. Нумеруются лишь формулы, на которые есть ссылки в тексте.

16. Необходимо использовать следующие установки редактора формул. Размеры: полный – 10 пт, подстрочный – 9 пт, под-подстрочный – 7 пт, символ – 14,5 пт, подсимвол – 12,5 пт. Стили: текст, функция, число, кириллица – шрифт «Times New Roman», вектор-матрица – шрифт «Times New Roman», жирный; греческий малый, греческий большой, символ – шрифт «Symbol», прямой; переменная – шрифт «Times New Roman», курсив.

17. Отдельные строчные буквы и специальные символы набираются в тексте гарнитурой Symbol **без использования редактора формул**. При наборе формул и буквенных обозначений необходимо учитывать следующие правила: **русский алфавит не используется**; греческие буквы, математические символы (grad, div, ln, min, max и др.), единицы измерения (Вт, Дж, В, кг и др.), кириллические буквы, сокращения от русских слов (q_{cp}); обозначения химических элементов и соединений (в т. ч. в индексе) набираются **прямо**; латинские буквы – переменные и символы физических величин (в т. ч. в индексе) набираются **курсивом**; векторы – жирным шрифтом (стрелки вверх не ставятся).

18. Начертание обозначений в формулах и в основном тексте должно быть полностью идентично. В расшифровке формул, которая начинается словом «где»,

символы и их порядок должны соответствовать символам и их порядку следования в формулах.

19. Список использованных источников составляется в порядке упоминания ссылок по тексту, должен содержать полные библиографические данные и приводится в конце статьи. Не рекомендуется давать ссылки на материалы конференций, статьи из электронных журналов без идентификатора DOI, учебные пособия, интернет-ресурсы. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Желательно, чтобы количество ссылок было не менее 10; самоцитирование – не более 20 %.

20. Авторы на отдельной странице предоставляют о себе следующие сведения: фамилия, имя, отчество, ученая степень и звание, место работы и занимаемая должность, адрес электронной связи.

21. Статьи, излагающие результаты исследований, выполненных в учреждениях, должны иметь соответствующее разрешение на опубликование в открытой печати.

22. При необходимости в конце основного текста указываются наименование фонда, оказавшего финансовую поддержку, или уровень и наименование программы, в рамках которой выполнена работа, на русском и английском языках.

23. Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, ранее уже опубликованных или принятых к печати другими изданиями.

24. Статьи, не соответствующие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются и возвращаются авторам. Датой поступления считается день получения редакцией первоначального варианта текста.

25. Редакция предоставляет возможность первоочередного опубликования статей лицам, осуществляющим послевузовское обучение (аспирантура, докторантура, соискательство), в год завершения обучения; не взимает плату с авторов за опубликование научных статей; оставляет за собой право производить редакторские правки, не искажающие основное содержание статьи.

AUTHOR GUIDELINES

1. Article materials should correspond to the journal profile and be clearly written.

2. An article should be submitted in Russian or English and will be published in its original language.

3. Articles received by the Editorial Board will be reviewed by 2 specialists. The main criteria of acceptance are theme actuality, information value, and scientific novelty.

4. All materials should be submitted in two hard copies together with electronic file in the Word for Windows format (97/2000/2003). The paper should not exceed 14 pages of the typewritten text (Times New Roman, 12 points, 1.5-space).

5. The article should contain UDC number, Title (printed in capitals), Authors' names (the corresponding author name should be marked with asterisk), full Address of organization(s) in which the author(s) work, Abstract (200–250 words), Keywords (not more than 5 words), Introduction, the Text of the paper with tables, diagrams and figures (if there are any), Conclusion with clearly stated inferences, List of References, List of Symbols and Abbreviations (if it is necessary). Title, Authors' names and affiliation(s), Abstract, Keywords should be presented both in English and Russian languages.

6. The abstract should be informative (contain "squeeze" from all sections of the article – the introduction stating the purpose of the work, methods, main part and conclusion).

7. Figures should be black-and-white, represented in graphical formats tif, attached with Excel or MS Graph and added with captions. All symbols in figures should be described.

8. Tables should be placed directly in the article body. Diagrams and tables should not contain the same information. Each table should have the title. All tables, diagrams and figures should be referenced in the text.

9. Symbols and abbreviations which are used in articles should be deciphered directly in the text and also (if necessary) taken out on a separate page.

10. Dimensions of all quantities used in the article should correspond to International System of Units.

11. Formulas should be typed in MathType.

12. List of References is to be placed at the end of the article with full bibliographic information. Order of references should correspond to the order of their occurrence in the text. It is not recommended to refer to conference proceedings, papers from electronic journals without DOI number, textbooks, internet resources. References on unpublished works are prohibited. It is recommended to refer to not less than 10 references, self-citations – not more than 20 %.

13. The following information about every co-author should be presented: family name, first name, patronymic (or second) name (if there are any), scientific degree and title, organization and position, full address with the postal code for correspondence, office or mobile phone numbers, fax, e-mail.

14. Articles containing investigation results obtained in organizations should have a corresponding permission for publication.

15. Names of Foundations or Programs financially granted the research may be acknowledged in the end of the text.

16. Authors are responsible for submitting articles previously published or accepted by other publisher.

17. Articles not meeting the requirements of the Editorial Board would not be accepted and may be returned to the authors. The date of receipt is considered to be the day when the Editorial Board receives the author's original paper.

18. Authors conducting postgraduate (graduate studies, doctoral studies) have a priority in publishing their articles out of queue in the year of completion. Authors do not pay for publishing scientific articles. The Editorial Board can shorten and/or change the text if it does not strain the meaning of the article.

Информация для подписчиков и рекламодателей

Научно-технический журнал «Приборы и методы измерений» издается 4 раза в год, на русском и английском языке. Распространяется на территории Беларуси, России и странах СНГ. В журнале публикуются оригинальные статьи прикладного и фундаментального характера, а также обзорные статьи о современном состоянии, важнейших достижениях и тенденциях развития приборостроительной отрасли в Республике Беларусь и за рубежом.

Журнал «Приборы и методы измерений» является отличной площадкой для продвижения результатов научных исследований не только известных, но и начинающих исследователей. Журнал включён в крупнейшие базы данных научного цитирования Web of Science Core Collection (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, РИНЦ, ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет, которые признаны самыми авторитетными для мирового научного сообщества.

Оформить подписку на журнал можно через подписные каталоги:
РУП «Белпочта», ООО «Прессинформ», ООО «Криэйтив Сервис Бэнд»,
ООО «Екатеринбург-Опт», ООО «Глобалпресс»

Подписной индекс журнала «Приборы и методы измерений»:
Ведомственный – 748352 Индивидуальный – 74835

Предлагаем услуги по размещению рекламы
в журнале «Приборы и методы измерений»

Вид рекламного модуля	Для Республики Беларусь Стоимость в бел. руб. с НДС	Для стран СНГ Стоимость в рос. руб.
На обложке (стр. 2, 3) полноцветный	689,88	26975
Внутри журнала (формат 1/1), полноцветный	536,49	20950
Внутри журнала (формат 1/2), полноцветный	263,27	11235
Внутри журнала (формат 1/1), черно-белый	363,10	11235
Внутри журнала (формат 1/2), черно-белый	181,56	5390

Размещение рекламы в очередном номере осуществляется после предварительной оплаты
Заказчиком

Информацию для рекламодателей можно получить по тел. (+375) 44 566 47 88,
e-mail: l.katkova@bntu.by

Адрес и телефоны редакции:

Республика Беларусь, 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, корп. 17, каб. 432
тел.: +375 17 293 96 67

www.pimi.bntu.by e-mail: pimi@bntu.by