

ISSN: 2220-9506 (Print)
ISSN: 2414-0473 (Online)

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

DEVICES AND METHODS
OF MEASUREMENTS

Том 9

№ 2

Vol. 9

2018

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Научно-технический журнал

Основан в 2010 г.

Учредитель

Белорусский национальный технический университет

Выходит 4 раза в год

Журнал включен в базу данных Web of Science Core Collection (ESCI)

Том 9

№ 2

2018

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, проректор Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

СЕКРЕТАРЬ

Воробей Р.И., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Информационно-измерительная техника и технологии» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Алексеев В.А., д.т.н., профессор, ученый секретарь Ижевского государственного технического университета (г. Ижевск, Россия)

Анищик В.М., д.ф.-м.н., профессор, декан физического факультета Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)

Белоус А.И., член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор, заместитель директора НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (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., д.т.н., профессор, директор Института механики Рижского технического университета (г. Рига, Латвия)

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

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

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

Достанко А.П., академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор, профессор кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (г. Минск, Беларусь)

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

Жагора Н.А., д.т.н., доцент, главный специалист по метрологии и стандартизации Белорусского государственного института метрологии (г. Минск, Беларусь)

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 устройств и техники высоких напряжений Люблинского технологического университета (г. Люблин, Польша)

Загашвили Ю.В., д.т.н., профессор, член Наблюдательного и Сертификационного совета Ассоциации по сертификации «Русский регистр» (г. Санкт-Петербург, Россия)

Киселев М.Г., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и производство приборов» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

- Колтунович Т.Н.**, д.т.н., профессор, Люблинский технологический университет (г. Люблин, Польша)
Комаров Ф.Ф., член-корреспондент НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)
Кулешов Н.В., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Лазерная техника и технология» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)
Кучинский П.В., д.ф.-м.н., доцент, директор Института прикладных физических проблем им. 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)
Машко В.В., д.ф.-м.н., заместитель директора Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси (г. Минск, Беларусь)
Муравьев В.В., член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор, профессор кафедры систем телекоммуникаций Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (г. Минск, Беларусь)
Пилипенко В.А., член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор, заместитель директора ГЦ «Белмикрoанализ» НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Беларусь)
Плескачевский Ю.М., член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор, советник Национальной академии наук Беларуси (г. Минск, Беларусь)
Погребняк А.Д., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой наноэлектроники Сумского государственного университета (г. Сумы, Украина)
Серенков П.С., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Стандартизация, метрология и информационные системы» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)
Соломахо В.Л., д.т.н., профессор, директор Республиканского института инновационных технологий Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)
Турцевич А.С., д.т.н., начальник управления Министерства промышленности Республики Беларусь (г. Минск, Беларусь)
Це Ли, заместитель директора Северо-Восточного НИИ техники датчиков (г. Харбин, КНР)
Чернявский А.Ф., академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор, профессор кафедры интеллектуальных систем Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)
Чижик С.А., академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор, Первый заместитель Председателя Президиума НАН Беларуси (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, заведующий кафедрой «Экспериментальная и теоретическая физика» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

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

**В соответствии с решением ВАК от 8 июля 2011 г. №13/1 журнал включен в Перечень научных изданий для опубликования результатов диссертационных исследований; научное направление: «Средства и методы измерений, контроля, диагностики и оценки качества объектов и процессов» (технические и физико-математические науки)
ISSN 2220-9506**

Журнал включен в базы данных: Web of Science Core Collection (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, РИНЦ, ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

*Подписка осуществляется через почтовые отделения связи по «Каталогу газет и журналов Республики Беларусь».
Подписные индексы – 74835; 748352.*

Ответственный секретарь редакции: Шахлевич Л.Н.

Макет и верстка: Чабарова О.Л., редактор: Иванова Т.А.

Подписано в печать 08.06.2018. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная.

Гарнитура Times New Roman. Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,59. Уч.-изд. л. 4,14. Тираж 150 экз.

Дата выхода в свет 13.06.2018. Заказ № 524.

Отпечатано в Белорусском национальном техническом университете. ЛИ № 02330/74 от 03.03.2014. Пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65, 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 Web of Science Core Collection (ESCI)

Volume 9

№ 2

2018

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, *Correspondent Member of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Vice-Rector of Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

Secretary

Roman I. Varabei, *PhD (Engineering), Associate Professor, Head of Information and Measuring Technologies Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

Editorial board

Vladimir A. Alekseev, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Scientific Secretary of Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russia)*

Victor M. Anishchik, *Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Dean of the Physics Faculty, Belarusian State University (Minsk, Belarus)*

Anatoly I. Belous, *Correspondent Member of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, Deputy Director of Branch of the Scientific-Technical Center «Belmicrosystems» of JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company (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, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Director of Institute of Mechanics, 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)*

Igor Z. Gilavdary, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Information and Measuring Technologies Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

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

Anatoly P. Dostanko, *Academician of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, Electronic Technology and Engineering Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)*

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

Nikalai A. Zhagora, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Head Specialist of Metrology and Standardization, Belarusian State Institute of Metrology (Minsk, Belarus)*

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

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

Yuri V. Zagashvili, *Doctor of Science (Engineering), Professor, the Member of the Supervisory and Certification Board of Association for the Certification «Russian Register» (St. Petersburg, Russia)*

Mikhail G. Kiselev, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Design and Manufacture of Devices Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

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

Fadey F. Komarov, Correspondent Member of National Academy of Sciences of Belarus, Professor, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Head of Physical Electronics and Nanotechnologies Department, Belarusian State University (Minsk, Belarus)

Nikolay V. Kuleshov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Laser Equipment and Technology Department, Belarusian National Technical 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, Universitat Rovira i Virgili (Tarragona, Spain)

Vasili V. Mashko, Doctor of Science (Engineering), Deputy Director of B.I. Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Belarus)

Valentin V. Murav'iov, Correspondent Member of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, Telecommunication Systems Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

Vladimir A. Pilipenko, Correspondent Member of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, Deputy Director of the State Center «Belmicroanalysis», Branch of the Scientific-Technical Center «Belmicrosystems» of JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company (Minsk, Belarus)

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

Alexander D. Pogrebnjak, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Department of Nanoelectronic, Sumy State University (Sumy, Ukraine)

Pavel S. Serenkov, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Standardization, Metrology and Information Systems Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

Vladimir L. Solomakho, Doctor of Science (Engineering), Professor, Director of the Republican Institute of Innovative Technologies, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

Arkady S. Turtsevich, Doctor of Science (Engineering), Chief of Department, the Ministry of Industry of the Republic of Belarus (Minsk, Belarus)

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

Alexander F. Cherniavsky, Academician of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, Intelligent Systems Department, Belarusian State University (Minsk, Belarus)

Sergei A. Chizhik, Academician of National Academy of Sciences of Belarus, Professor, Doctor of Science (Engineering), the First Vice Chairman of the Presidium of National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Belarus)

Alexey P. Shkadarevich, Academician of 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, Head of Experimental and Theoretical Physics Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

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

ADDRESS:

Belarusian National Technical University
Nezavisimosty Ave, 65, 220013, Minsk, 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

Бурмаков А.П., Кулешов В.Н., Столяров А.В.

Система стабилизации процесса реактивного магнетронного распыления.....	114
---	-----

Левецкий А.С., Зайцев Е.А., Кобзарь К.А.

Измерение хода тарельчатых пружин в силовых аккумуляторах сердечника статора турбогенератора с помощью емкостного сенсора.....	121
--	-----

Методы измерений, контроля, диагностики

Поклонский Н.А., Ковалев А.И., Горбачук Н.И., Шпаковский С.В.

Расчет статических параметров кремниевого диода, содержащего в симметричном $p-n$ -переходе δ -слой точечных трехзарядных дефектов.....	130
--	-----

Баев А.Р., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Коновалов Г.Е., Сергеева О.С.

Трансформация и рассеяние поверхностных волн на акустической нагрузке для ультразвукового контроля и измерений. Ч. 2. Объект исследования – тело с выступом.....	142
--	-----

Серенков П.С., Гуревич В.Л., Мовламов В.Р., Етумян А.С.

Риск-ориентированный подход к разработке методик контроля.....	155
--	-----

Petrushak V.S.

Measurement of the amplitude of periodic signals using the Fibonacci method.....	167
--	-----

Гринчук А.П., Будай А.Г., Громько А.В.

Применение статистических методов для оценки метрологических характеристик радиологических измерительных комплексов.....	173
--	-----

Методы оценки качества объектов и процессов

Фёдорцев Р.В., Шкадаревич А.П., Ийд Кусай Мохамед, Фуфаев А.В.

Методы повышения эффективности работы двухканального оптико-электронного прицела.....	182
---	-----

CONTENTS

Measuring Instruments

Burmakou A.P., Kuleshov V.N., Stoliarov A.V.

System of stabilization of reactive magnetron sputtering process..... 114

Levytskyi A.S., Zaitsev I.O., Kobzar K.O.

Measuring the stroke of cone disk springs in power accumulators of the turbogenerator stator core using a capacitive sensor..... 121

Methods of Measurements, Monitoring, Diagnostics

Poklonski N.A., Kovalev A.I., Gorbachuk N.I., Shpakovski S.V.

Calculation of static parameters of silicon diode containing δ -layer of triple-charged point defects in symmetric p - n -junction..... 130

Baev A.R., Mayorov A.L., Asadchaya M.V., Konovalov G.E., Sergeeva O.S.

Transformation and scattering of surface waves on the acoustic load to ultrasonic evaluation and measurements. Part 2. The object to study – solid with ledge..... 142

Serenkov P.S., Hurevich V.L., Movlamov V.R., Yetumyan A.S.

The risk-oriented approach to the development of control method..... 155

Petrushak V.S.

Measurement of the amplitude of periodic signals using the Fibonacci method..... 167

Grinchuk A., Buday A., Gromyko A.

Application of statistical methods to assess the metrological characteristics of radio-holographic measuring complexes..... 173

Methods of quality estimation of products and processes

Fiodortcev R.V., Shkadarevich A.P., Qusai Eid Mohammad, Fufaev A.V.

Methods for increasing the efficiency of a dual-channel opto-electronic sight..... 182

УДК 62-529

Система стабилизации процесса реактивного магнетронного распыления

Бурмаков А.П., Кулешов В.Н., Столяров А.В.

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

Поступила 11.03.2018

Принята к печати 12.04.2018

Пленочные покрытия сегодня позволяют создать большое количество разнообразных структур в электронике, микроэлектронике, оптике, архитектуре и строительстве. Лидирующими технологиями в этой области являются магнетронные технологии осаждения. Проблемой магнетронных методов осаждения является недостаточная воспроизводимость состава и свойств покрытий, обусловленная неустойчивостью параметров магнетронного разряда при наличии реактивного газа. Существуют системы стабилизации, которые позволяют получать воспроизводимые пленки, однако все они имеют ряд недостатков. Целью работы являлась разработка системы стабилизации процесса реактивного магнетронного распыления для технологий нанесения пленочных покрытий, которая устранила бы описанные недостатки существующих систем.

Разработанная система стабилизации является модульной и состоит из датчиков, исполнительных устройств, микрокомпьютера с управляющим программным обеспечением, а также устройств, обеспечивающих взаимодействие датчиков и исполнительных устройств с микрокомпьютером. Датчиками системы могут выступать вакуумметры или датчики давления, датчики разрядного тока и напряжения распылителей, оптические датчики регистрации интенсивности спектральных элементов излучения плазмы магнетронного разряда. Исполнительными устройствами системы являются нагреватели газов, а также клапана. Количество и тип датчиков и исполнительных устройств определяются исходя из конфигурации технологической установки и требований к проводимым процессам. Управляющее программное обеспечение позволяет гибко настраивать систему (формировать контуры управления, т.е. задавать в соответствии датчики и исполнительные устройства и выбирать алгоритм управления, задавать параметры и режимы работы контуров управления). Таким образом разработанная система является адаптируемой к широкому кругу технологических установок и проводимых процессов.

Работоспособность системы была подтверждена при проведении процесса магнетронного осаждения пленки оксида титана. Отклонение уровня сигналов датчиков от требуемых значений при проведении процесса не превышало 3 %, что позволяет получать качественные покрытия.

Ключевые слова: реактивное магнетронное распыление, система, управление.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-114-120

Адрес для переписки:

Столяров А.В.
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, г. Минск 220050, Беларусь
e-mail: alexei.stoliarov@gmail.com

Address for correspondence:

Stoliarov A.V.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220050, Belarus
e-mail: alexei.stoliarov@gmail.com

Для цитирования:

Бурмаков А.П., Кулешов В.Н., Столяров А.В.
Система стабилизации процесса реактивного магнетронного распыления.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 2. – С. 114–120.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-114-120

For citation:

Burmakou A.P., Kuleshov V.N., Stoliarov A.V.
[System of stabilization of reactive magnetron sputtering process].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 2, pp. 114–120 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-114-120

System of stabilization of reactive magnetron sputtering process

Burmakou A.P., Kuleshov V.N., Stoliarov A.V.

*Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220050, Belarus*

Received 11.03.2018

Accepted for publication 12.04.2018

Abstract

Film coatings today allow to create large number of diverse structures in electronics, microelectronics, optics, architecture and construction. Leading technologies in this area are magnetron deposition technologies. The problem of magnetron deposition methods is insufficient reproducibility of the composition and properties of coatings, caused by the instability of the parameters of a magnetron discharge in the presence of a reactive gas. There are stabilization systems that make it possible to make reproducible films, but all of them have a number of issues. The aim of the work was to develop a system for stabilizing the reactive magnetron sputtering process for film coating technologies that will eliminate the described shortcomings of existing systems.

The developed system of stabilization: automatic and cumulative of sensors, actuators, microcomputer with control software, as well as devices providing interaction of sensors and actuators with a microcomputer. The sensors of the system may be vacuum gauges or pressure sensors, discharge current and voltage sensors of sprays, optical sensors for recording spectral element processes, absorption of a plasma of a magnetron discharge. The actuators of the system are gas flowers, as well as valves. Number and type of sensors and actuators from existing technologies and requirements for ongoing processes. The control software allows to flexibly adjust the system (to form control loops, then to assign sensors and actuators in accordance and to choose control algorithms, to set parameters and operating modes of control loops). Thus, the developed system is adaptable to a wide range of process plants and processes.

System operability was confirmed by the process of magnetron deposition of a titanium oxide film. The deviation of the level of the sensor signals from the required values during the process did not exceed 3 %, which allows obtaining high-quality coatings.

Keywords: reactive magnetron sputtering, system, control.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-114-120

Адрес для переписки:

Столяров А.В.
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, г. Минск 220050, Беларусь
e-mail: alexei.stoliarov@gmail.com

Address for correspondence:

Stoliarov A.V.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220050, Belarus
e-mail: alexei.stoliarov@gmail.com

Для цитирования:

Бурмаков А.П., Кулешов В.Н., Столяров А.В.
Система стабилизации процесса реактивного магнетронного распыления.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 2. – С. 114–120.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-114-120

For citation:

Burmakou A.P., Kuleshov V.N., Stoliarov A.V.
[System of stabilization of reactive magnetron sputtering process].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 2, pp. 114–120 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-114-120

Введение

Магнетронные технологии в настоящее время занимают лидирующее положение среди технологий нанесения пленочных покрытий в электронике и микроэлектронике (металлизация, контактные структуры, ЖК-индикаторы, диэлектрические и защитные покрытия), оптике (интерференционные фильтры и зеркала, просветление, антибликовые и защитные покрытия), архитектуре и строительстве (декоративные и теплосберегающие покрытия), машиностроении (упрочняющие, защитные и трибологические покрытия) и др. Наиболее распространенные материалы покрытий: пленки металлов и полупроводников, а также пленки таких химических соединений как оксиды, нитриды, карбиды и карбонитриды, получаемые при использовании смеси инертного и реакционно-способного газа.

В процессах нанесения пленок химических соединений основной проблемой магнетронных технологий является недостаточная воспроизводимость состава покрытий, обусловленная неустойчивостью параметров магнетронного разряда при наличии реактивного газа [1–3]. Для стабилизации процесса нанесения необходимо обеспечить обратную связь между параметрами магнетронного разряда и расходом инертного и реактивного газов [4] путем автоматического управления расходом газов в реальном времени, используя характеристики разряда. Такое управление может базироваться на излучении разряда, регистрируемом методом оптической эмиссионной спектроскопии (оптическое управление), химическом составе плазмы разряда, регистрируемом методом масс-спектроскопии, или на электрических (ток, напряжение, мощность) параметрах разряда, регистрируемых традиционными измерительными устройствами. По ряду причин масс-спектроскопия не получила широкого распространения. Наиболее простым в реализации является управление по электрическим параметрам разряда, однако его применение ограничено в силу слабой или неоднозначной зависимости этих параметров от свойств плазмы магнетронного разряда. Известные системы стабилизации [5–7] реализующие указанные подходы имеют ряд общих недостатков:

– малое максимальное количество подключаемых датчиков и исполнительных устройств, что является недостаточным для сложных технологических установок с большим числом распылителей;

– цепи входных и выходных сигналов указанных систем подключаются к единому модулю, что вызывает определённые трудности с установкой устройств в случае крупногабаритных вакуумных камер и низкую помехозащищённость из-за длинных кабелей с аналоговыми сигналами.

Целью работы являлась разработка системы стабилизации процесса реактивного магнетронного распыления для технологий нанесения пленочных покрытий, которая устранила описанные выше недостатки.

Осаждение пленочных покрытий сложного химического состава

В технологиях реактивного магнетронного распыления подача реактивного газа в вакуумную камеру значительно усложняет физические процессы, сопровождающие распыление катода и формирование пленочного покрытия [8, 9]. Магнетронный разряд становится неустойчивым, т. е. возможно самопроизвольное изменение параметров плазмы магнетронного разряда при сохранении на постоянном уровне характеристик процесса: мощности разряда, давления в вакуумной камере, расхода инертного и реактивного газов, скорости откачки газов из вакуумной камеры. Неустойчивость системы распыляемая мишень (катод) – плазма–пленка приводит к самопроизвольному ее переходу в одно из двух устойчивых состояний процесса даже при сохранении на постоянном уровне характеристик разряда. Первое состояние – это распыление с «металлической» мишенью, когда доля химического соединения в осаждаемом покрытии низка, т. е. реализуется осаждение практически металлического покрытия. Второе состояние – это распыление с «реактивной» мишенью, когда распыляемая поверхность катода (мишени) полностью покрыта пленкой химического соединения и осаждаемое покрытие состоит из этого соединения и растворенных в нем частиц реактивного газа. Для практики применения реактивных процессов в первую очередь интересны именно неустойчивые промежуточные состояния, так как в таких состояниях получают пленки требуемых свойств с максимальной скоростью их осаждения.

Наиболее эффективным методом управления реактивными магнетронными технологиями, подходящим для широкого круга процессов, является оптический метод, использующий излучение плазмы магнетронного разряда, а именно оптическую эмиссионную спектроскопию.

Общий подход к алгоритмам оптического управления процессами реактивного магнетронного распыления сводится к одновременной регистрации относительной интенсивности элементов эмиссионного спектра разряда (спектральных линий, молекулярных полос), которые однозначно характеризуют состав осаждаемого потока [10]. Используя интенсивности этих элементов, необходимо вырабатывать сигналы в реальном времени, управляющие параметрами разряда. При этом управляющие сигналы должны обеспечивать вывод химического состава плазмы на требуемые величины и его поддержание с необходимой точностью. Если расположить параметры разряда по степени их влияния на воспроизводимость свойств пленочного покрытия, то, в первую очередь, необходимо управлять расходом реактивного газа, затем мощностью разряда и далее давлением в вакуумной камере [10].

Разработка системы стабилизации

При разработке системы стабилизации, исходя из цели разработки, к ней предъявлялись следующие требования:

- реализовать алгоритмы управления процессами реактивного магнетронного осаждения;
- модульность системы для возможности адаптации её к различным технологическим установкам;
- гибкая настройка системы для возможности реализации широкого круга технологических процессов.

Исходя из вышеперечисленных требований нами была разработана модульная система, адаптируемая к широкому кругу технологических установок. На рисунке 1 представлена структурная схема возможной реализации системы стабилизации для наиболее распространенного случая проведения процесса реактивного магнетронного распыления.

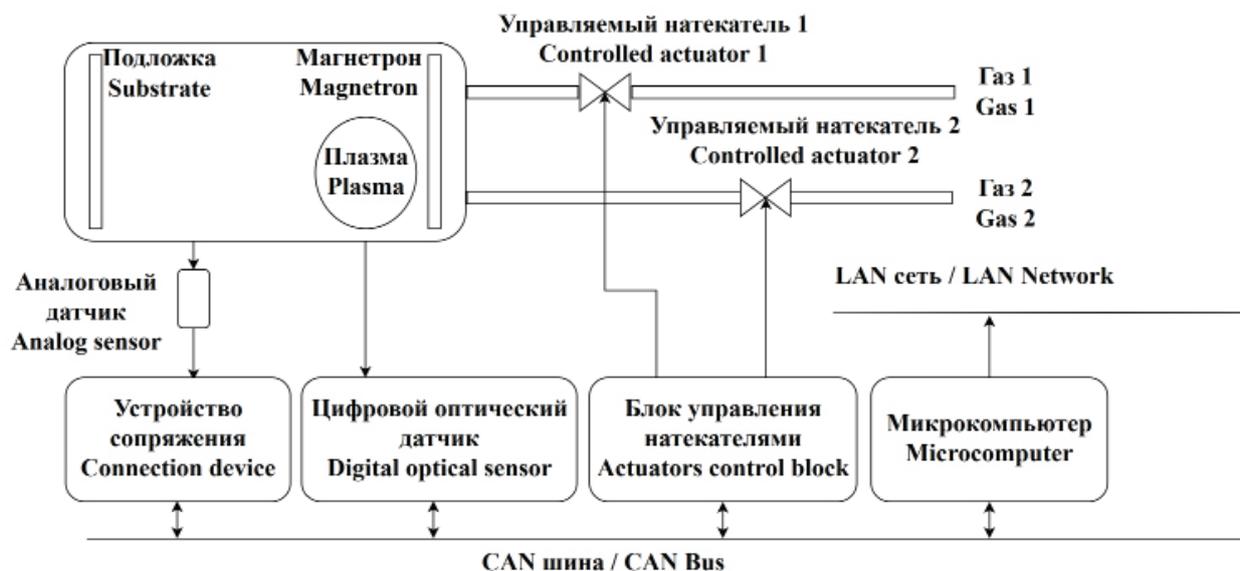


Рисунок 1 – Структурная схема системы управления расходом газов
Figure 1 – Structural scheme of gas flow control system

Данная система состоит из аналогового датчика давления газа в вакуумной камере (ДА), устройства сопряжения (УС), цифрового оптического датчика (ДО), блока управления натекателями (БУН), управляемых натекателей (Н1, Н2) для подачи в вакуумную камеру инертного и реактивного газов соответственно, микрокомпьютера с управляющим программным обеспечением. Количество и тип датчиков, натекателей, устройств сопряжения, блоков управления натекателями определяются исходя из конфигурации технологической установки и требований к производимым процессам.

Аналоговыми датчиками системы могут выступать вакуумметры или датчики давления, датчики разрядного тока и напряжения распылителей. Устройство сопряжения служит для преобразования аналогового сигнала датчика в цифровую форму и передачи величины сигнала на шину CAN. К одному устройству сопряжения можно подключить до двух аналоговых датчиков.

Цифровые оптические датчики служат для регистрации интенсивности спектральных элементов (линий и молекулярных полос) оптического спектра излучения плазмы магнетронного разряда. Выбор этих элементов и их количество

определяется алгоритмом управления конкретного процесса нанесения пленочного покрытия. ДЦ состоит из светофильтра, выделяющего необходимый спектральный элемент из излучения плазмы разряда [11], фотодиода и контроллера, обеспечивающего передачу величины сигнала интенсивности на шину CAN. Для регистрации интенсивности каждого спектрального элемента используется по одному ДЦ.

Исполнительными устройствами системы являются натекатели газов, регулирующие расход каждого рабочего газа и формирующие требуемую смесь газов, а также клапана, коммутирующие газовую смесь на распылители.

БУН обеспечивает выработку электрических сигналов управления устройствами подачи газов. В составе системы могут использоваться два вида БУН в зависимости от типа устройств газового напуска:

1. БУН для управления вибронатекателями. Блок содержит пять выходов, к каждому из которых может быть подключен вибронатекатель или клапан.

2. БУН для управления регуляторами расхода газа (РРГ). Блок содержит четыре аналоговых выхода, к каждому из которых можно подключить РРГ либо натекатель, управляемый уровнем напряжения постоянного тока. В данном виде БУН имеется один дополнительный выход, к которому может быть подключен вибронатекатель или клапан.

Управление вибронатекателями осуществляется ШИМ сигналом напряжением 24 В и частотой 15 Гц. Открытие клапанов осуществляется постоянным напряжением 24 В. Управление РРГ осуществляется постоянным напряжением, изменяемым в диапазоне 0–5 В или 0–10 В. Использование выходного сигнала БУН с такими характеристиками делает возможным управление не только расходом газа, но и параметрами блока питания магнетронного разряда (ток или напряжение).

Корпуса устройств сопряжения и блоков управления натекателями предназначены для установки на DIN-рейку, цифровых оптических датчиков – на стенку вакуумной камеры. Питание УС, ДЦ, БУН осуществляется от стабилизированного блока питания напряжением 24 В.

Обмен информацией между микрокомпьютером, устройствами сопряжения, цифровыми оптическими датчиками и блоками управления натекателями происходит посредством высо-

конадежной помехозащищённой шины CAN, использование которой позволяет располагать устройства на значительном удалении друг от друга исходя из минимизации длины цепей аналоговых сигналов. В целях дополнительного повышения помехозащищённости входы УС и выходы БУН гальванически изолированы от шины CAN. Используемый протокол обмена между устройствами позволяет использовать до 127 датчиков и исполнительных устройств на шине CAN.

Задачей микрокомпьютера является опрос сигналов с датчиков и управление исполнительными устройствами по алгоритмам, обеспечивающим воспроизводимость свойств покрытий [10]. Микрокомпьютер предоставляет пользовательский интерфейс, а также интерфейс для удаленного управления. Разработано клиентское приложение пользовательского интерфейса, которое доступно из сети по адресу устройства. Программное обеспечение позволяет гибко настраивать систему управления (формировать контуры управления, т.е. задавать соответствие датчиков и исполнительных устройств и выбирать алгоритм управления, задавать параметры и режимы работы контуров управления).

Тестирование системы

Работоспособность реализации системы управления, представленной на рисунке 1, была проверена при проведении процессов магнетронного осаждения пленок оксида титана. Использовался планарный магнетронный распылитель с титановой мишенью диаметром 15 см и типичной мощностью разряда 1,5 кВт. В качестве датчика давления ДА выступал вакуумметр ВИТ-3. В оптическом датчике ДЦ применен светофильтр, выделяющий группу спектральных линий титана в диапазоне длин волн 511–523 нм. Вибронатекатель Н1 задавал расход аргона, Н2 – кислорода. В программном обеспечении микрокомпьютера было сконфигурировано два контура управления:

1. ДА–Н1 – контур поддержания общего давления в камере путём управления расходом аргона по величине сигнала давления.

2. ДЦ–Н2 – контур, реализующий для процесса осаждения оксида титана одноканальный алгоритм управления [10] расходом кислорода по интенсивности спектральных линий титана.

Тестирование системы проводилось следующим образом:

1. В предварительно откачанную вакуумную камеру до давления порядка 10^{-3} Па производился напуск аргона, давление которого поддерживалось на постоянном уровне $0,5$ Па с помощью контура управления ДА–Н1.

2. Включение магнетронного разряда в среде аргона и напуск кислорода в вакуумную камеру. Управление расходом кислорода производилось с помощью контура управления ДЦ–Н2, который обеспечивал вывод интенсивности спектральных линий титана на заданный уровень, соответствующий осаждению плёнки оксида титана стехиометрического состава.

Для контроля за ходом процесса фиксировалась динамика изменения интенсивности спектральных линий магнетронного разряда с помощью спектрометра S100 [12]. На рисунке 2 изображена динамика интенсивности спектральных линий кислорода $777,3$ нм и титана $519,3$ нм, начиная с момента подачи кислорода в вакуумную камеру. Эти линии являются характерными для процесса нанесения оксида титана, так как их интенсивности пропорциональны концентрации атомов кислорода и титана в осаждаемом потоке, следовательно, в формируемой пленке. Выход интенсивностей этих линий на постоянное значение и поддержание этого значения говорит о качественном проведении процесса. Системой обеспечивалось постоянство давления и состава смеси инертного и реактивного газов при магнетронном осаждении покрытий. Отклонение (колебания) уровня сигналов датчиков от требуемых значений при проведении процесса не превышало 3% .

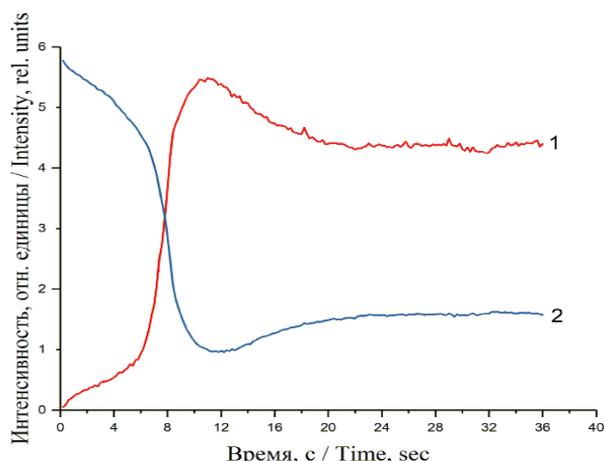


Рисунок 2 – Динамика изменения относительной интенсивности спектральных линий OI (1) и TiI (2) при проведении процесса магнетронного нанесения оксида титана
Figure 2 – Dynamics of changes in the relative intensity of spectral lines OI (1) and TiI (2) during the process of magnetron deposition of titanium oxide

Заключение

Разработана модульная система стабилизации процесса реактивного магнетронного распыления с возможностью реализации широкого круга технологических процессов и адаптируемая к различным технологическим установкам. Система состоит из датчиков, исполнительных устройств, микрокомпьютера с управляющим программным обеспечением, а также устройств, обеспечивающих взаимодействие датчиков и исполнительных устройств с микрокомпьютером. Системой обеспечивается постоянство давления и состава смеси инертного и реактивного газов при магнетронном осаждении покрытий.

Работоспособность системы была подтверждена при проведении процесса магнетронного осаждения пленки оксида титана. Отклонение уровня сигналов датчиков от требуемых значений при проведении процесса не превышало 3% , что позволяет получать качественные покрытия.

Список использованных источников

1. Berg, S. Fundamental understanding and modeling of reactive sputtering processes / S. Berg, T. Nyberg // *Thin Solid Films*. – 2005. – Vol. 476, no. 2. – P. 215–230.
2. Берлин, Е.В. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии / Е.В. Берлин, Л.А. Сейдман. – Москва: Техносфера, 2010. – 528 с.
3. Brudnik, A. Plasma-emission-controlled magnetron sputtering of TiO_2 x thin films / A. Brudnik, H. Czernastek, K. Zakrzewska // *Thin Solid Films*. – 1991. – Vol. 199, no. 1. – P. 45–58. doi: 10.1016/0040-6090(91)90051-X
4. Sproul, W.D. Control of reactive sputtering processes / W.D. Sproul, D.J. Christie, D.C. Carter // *Thin Solid Films*. – 2005. – Vol. 491, no. 1/2. – P. 1–17. doi: 10.1016/j.tsf.2005.05.022
5. Регулятор расхода газа [Электронный ресурс] / ООО «ВТТ». – Режим доступа: <https://vacuumtt.all.biz/regulyator-rashoda-gaza-g627980>. – Дата доступа: 14 февраля 2018 г.
6. Plasma monitor and process control systems [Electronic resource] / PLASUS Spectroscopic plasma monitor and process control systems. – Mode of access: http://www.plasus.de/index.php?page=system_allgemein&lang=en. – Date of access: 14.02.2018.
7. Speedflo [Electronic resource] / Gencoa. – Mode of access: <http://www.gencoa.com/speedflo>. – Date of access: 14.02.2018.
8. Свадковский, И.В. Ионно-плазменные методы формирования тонкопленочных покрытий: Монография / И.В. Свадковский; под ред. А.П. Досатанко. – Минск: Бестпринт, 2002. – 214 с.

9. Достанко, А.П. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники: в 3-х т. / А.П. Достанко; под ред. А.П. Достанко. – Минск : ФУАинформ, 2000. – 495 с.

10. Бурмаков, А.П. Алгоритмы оптического управления реактивным магнетронным осаждением пленочных покрытий / А.П. Бурмаков, В.Н. Кулешов // Журнал прикладной спектроскопии. – 2012. – Т. 79, № 3. – С. 430–435. **doi:** 10.1007/s10812-012-9616-0

11. Бурмаков, А.П. Монохроматизация излучения для спектрального контроля плазменных технологических процессов / А.П. Бурмаков, А.А. Лабуда, Н.Н. Никифорова // Журнал прикладной спектроскопии. – 1998. – Т. 65, № 4. – С. 587–589. **doi:** 10.1007/BF02675656

12. Компактный широкодиапазонный спектрометр Модель S100 [Электронный ресурс] / SOLAR Laser Systems. – Режим доступа: <https://solarlaser.com/ru/products/compact-spectrometers/compact-wide-range-spectrometer-model-s100/>. – Дата доступа: 14.02.2018 г.

References

1. Berg S., Nyberg T. Fundamental understanding and modeling of reactive sputtering processes. *Thin Solid Films*, 2005, vol. 476, no. 2, pp. 215–230. **doi:** 10.1016/j.tsf.2004.10.051

2. Berlin E.V., Seydman L.A. *Ionno-plazmennyye processy v tonkoplennoy tehnologii* [Ion-plasma processes in thin film technology]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2010. 528 p. (in Russian).

3. Brudnik A., Czernastek H., Zakrzewska K. Plasma-emission-controlled magnetron sputtering of TiO₂ x thin films. *Thin Solid Films*, 1991, vol. 199,

no. 1, pp. 45–58. **doi:** 10.1016/0040-6090(91)90051-X

4. Sproul W.D., Christie D.J., Carter D.C. Control of reactive sputtering processes. *Thin Solid Films*, 2005, vol. 491, no. 1/2, pp. 1–17. **doi:** 10.1016/j.tsf.2005.05.022

5. *Gas consumption regulator*. Available at: <http://vacuumtt.com/en/gas-consumption-regulator-g627980> (accessed 14.02.2018).

6. *Plasma monitor and process control systems*. Available at: http://www.plasus.de/index.php?page=system_allgemein&lang=en (accessed 14.02.2018).

7. *Speedflo*. Available at: <http://www.genco.com/speedflo> (accessed 14.02.2018).

8. Svadkovskiy I.V. *Ionno-plazmennyye metody formirovaniya tonkoplennoykh pokrytiy: Monografiya* [Ion-plasma methods of thin film coatings forming: Monograph]. Minsk, Bestprint Publ., 2002. 214 p. (in Russian).

9. Dostanko A.P. *Plazmennyye processy v proizvodstve izdeliy elektronnoy tehniki: v 3 h t.* [Plasma processes in production of electronic technics goods: in 3 vol.]. Minsk, FUAinform Publ., 2000. 495 p. (in Russian).

10. Burmakou A.P., Kuleshov V.N. Algorithms for optical control of reactive magnetron deposition of film coatings. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2012, vol. 79, no. 3, pp. 410–415. **doi:** 10.1007/s10812-012-9616-0

11. Burmakov A.P., Labuda A.A., Nikiforenko N.N. Monochromatization of radiation for spectral control of plasma technological processes. *Journal of Applied Spectroscopy*, 1998, vol. 65, no. 4, pp. 611–613. **doi:** 10.1007/BF02675656

12. *Compact Wide-Range Spectrometer Model S100*. Available at: <https://solarlaser.com/en/products/compact-spectrometers/compact-wide-range-spectrometer-model-s100/> (accessed 14.02.2018).

УДК 621.586.772; 621.313.32

Измерение хода тарельчатых пружин в силовых аккумуляторах сердечника статора турбогенератора с помощью емкостного сенсора

Левецкий А.С.¹, Зайцев Е.А.¹, Кобзарь К.А.²

¹Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, г. Киев 03680, Украина

²Завод «Электротяжмаши»,
пр. Московский, 299, г. Харьков 61089, Украина

Поступила 25.01.2018

Принята к печати 04.05.2018

Безаварийная и эффективная работа мощных турбогенераторов в значительной степени зависит от стабильности их основных механических параметров, к которым относится давление прессовки сердечника статора. Целью работы являлось обоснование возможности применения многоэлементного емкостного сенсора с компланарными электродами для измерения хода тарельчатых пружин в силовых аккумуляторах систем стабилизации давления сердечника статора турбогенератора.

Состояние прессовки сердечника косвенным образом можно оценить, измеряя ход тарельчатых пружин в силовых аккумуляторах, которые устанавливаются на стяжных призмах сердечника вместо стяжных гаек. Для измерения хода пружин предложено применение компланарного емкостного сенсора с секторальными электродами, который встраивается в конструкцию силовых аккумуляторов. Каждый сектор содержит свой элементарный сенсор, который размещен на кольцевой диэлектрической пластине и образован компланарными электродами, являющимися составной частью соосных концентрических колец, образующих компланарный емкостной сенсор. Сенсор состоит из высокопотенциального, низкопотенциального и заземленного электродов. Заземленный электрод расположен между высокопотенциальным и низкопотенциальным электродами, а также вокруг них.

Приведена упрощенная аналитическая модель расчета для получения аналитической зависимости изменения информативной составляющей электрической емкости сенсора от хода тарельчатых пружин в силовых аккумуляторах. Достоверность модели и характеристики зависимости подтверждена экспериментально при испытании лабораторного образца емкостного сенсора.

Ключевые слова: турбогенератор, стабилизация давления прессовки сердечника статора, силовой аккумулятор, тарельчатая пружина, емкостный сенсор.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-121-129

Адрес для переписки:

Зайцев Е.А.
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, г. Киев 03680, Украина
e-mail: zaitsev@i.ua

Address for correspondence:

Zaitsev I.O.
The Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine,
Peremogy Ave., 56, Kyiv 03057, Ukraine
e-mail: zaitsev@i.ua

Для цитирования:

Левецкий А.С., Зайцев Е.А., Кобзарь К.А.
Измерение хода тарельчатых пружин в силовых аккумуляторах сердечника статора турбогенератора с помощью емкостного сенсора. Приборы и методы измерений. 2018. – Т. 9, № 2. – С. 121–129.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-121-129

For citation:

Levytskyi A.S., Zaitsev I.O., Kobzar K.O.
[Measuring the stroke of cone disk springs in power accumulators of the turbogenerator stator core using a capacitive sensor]. *Devices and Methods of Measurements*. 2018, vol. 9, no. 2, pp. 121–129 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-121-129

Measuring the stroke of cone disk springs in power accumulators of the turbogenerator stator core using a capacitive sensor

Levytskyi A.S.¹, Zaitsev I.O.¹, Kobzar K.O.²

¹The Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine,
Peremogy Ave., 56, Kyiv 03057, Ukraine

²State Enterprise plant «Electrotyazmsh»,
Moskovsky Ave., 299, Kharkiv 61089, Ukraine

Received 25.01.2018

Accepted for publication 04.05.2018

Abstract

The troubleproof and efficient work of powerful turbogenerators depends on the stability of their main mechanical parameters, which include the stator core pressing. The aim of the work was to describe the possibility of using a multielement capacitive sensor with coplanar electrodes to measure the movement of disk springs of the stabilizer systems power batteries in the turbogenerator stator core.

The state of the core pressurizer can be indirectly assessed by measuring the displacement of the disk springs in power accumulators, which are installed on the tightening prism of the core instead of the compression nuts. To measure the movement of springs, a coplanar capacitive sensor with sectoral electrodes built into the power accumulators design is proposed. Each sector contains its own elementary sensor formed by coplanar electrodes. Each elementary sensor in each sector is placed on an annular dielectric plate and is formed by coplanar electrodes that are part of coaxial concentric rings. The sensor consists of a high-potential, low-potential and grounded electrodes. A grounded electrode is located between the high-potential and low-potential electrodes, as well as around them.

A simplified analytical calculation model for obtaining the analytical response characteristic of the change in the informative component of the sensor electric capacity on the course of the disk springs in the CA is presented. The reliability of the model and the response characteristics are confirmed experimentally by testing a laboratory prototype of a capacitive sensor.

Keywords: turbogenerator, stabilization of the pressure of pressing the stator core, power accumulator, cone disk spring, capacitive sensor.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-121-129

Адрес для переписки:

Зайцев Е.А.
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, г. Киев 03680, Украина
e-mail: zaitsev@i.ua

Address for correspondence:

Zaitsev I.O.
The Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine,
Peremogy Ave., 56, Kyiv 03057, Ukraine
e-mail: zaitsev@i.ua

Для цитирования:

Левицкий А.С., Зайцев Е.А., Кобзарь К.А.
Измерение хода тарельчатых пружин в силовых аккумуляторах сердечника статора турбогенератора с помощью емкостного сенсора. Приборы и методы измерений. 2018. – Т. 9, № 2. – С. 121–129.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-121-129

For citation:

Levytskyi A.S., Zaitsev I.O., Kobzar K.O.
[Measuring the stroke of cone disk springs in power accumulators of the turbogenerator stator core using a capacitive sensor]. *Devices and Methods of Measurements*. 2018, vol. 9, no. 2, pp. 121–129 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-121-129

Введение

Безаварийная и эффективная работа мощных турбогенераторов (ТГ) в значительной степени зависит от стабильности их основных механических параметров, к которым относится давление прессовки сердечника статора. Снижение давления представляет большую опасность и ограничивает работоспособность ТГ [1, 2].

Основными причинами снижения среднего давления прессовки являются самоотвинчивание гаек стяжных призм и неизбежная усадка шихтованных пакетов сердечника, состоящего из лакированных листов, в результате упруговязкого течения лаковых пленок, т.е. процесса старения сердечника.

Самым простым способом ликвидации ослабления прессовки сердечника является ручная подтяжка гаек на стяжных призмах [2]. Гайки подтягивают специальным ключом, создавая нормированный крутящий момент. Подтяжку начинают с той стороны машины, где обнаружилось ослабление. При этом контроль подтяжки осуществляют, измеряя величину аксиального зазора между нажимной плитой и элементами корпуса статора. По понятным причинам такой способ является субъективным и малопроизводительным.

В работе [3] описан способ восстановления давления прессовки сердечника ТГ путем автоматической подтяжки каждой гайки червячным редуктором с электроприводом. Контроль процесса стабилизации при этом процессе производят, измеряя усилие в стяжных призмах с помощью волоконно-оптических сенсоров на основе решеток Брега, наклеенных на специальную коническую шайбу, устанавливаемую под стяжными гайками [4]. Также для подтяжки гаек могут использоваться гидравлические устройства с автоматическим контролем процесса стабилизации давления прессовки дифференциальными трансформаторными датчиками линейных перемещений типа *LVDT* (*linear voltage differential transformer*), измеряющих осевое смещение нажимной плиты ТГ [5]. Оба способа стабилизации прессовки сердечника очень сложные и дорогие при их практическом использовании на эксплуатируемых ТГ.

Перспективным и сравнительно недорогим способом, который используется для стабилизации давления прессовки сердечника статора ТГ, является применение силовых аккумуляторов

(СА) с блоками тарельчатых пружин – специальных пружинных устройств с заданным и регулируемым усилием, устанавливаемых вместо гаек на стяжные призмы [6–13]. Первые СА были разработаны для ТГ типа ТГВ и могли быть установлены только в процессе изготовления статора. В дальнейшем были созданы СА, позволяющие монтаж как на заводе, так и при модернизации сердечника активной стали в условиях станции – до укладки обмотки. Такие СА применены для ТГ типа ТВВ-220-2 и ТВВ-320-2, наиболее подверженных повреждению торцевых зон, и установлены на АЭС Финляндия и Греции, на ГРЭС – Костромской, Киришской, Азербайджанской, Лукомльской и др. [11]. При этом контроль процесса стабилизации давления прессовки осуществляют, измеряя стандартными мерительными инструментами смещение нажимной плиты или отдельных частей СА [9].

В работе [10] предложена конструкция СА, в котором для контроля степени стабилизации давления прессовки используется емкостный сенсор хода тарельчатых пружин. В сенсоре с переменным зазором одним из электродов является заземленный элемент СА (металлическое нажимное кольцо), а вторым – тонкий проводящий слой на диэлектрической пластине, жестко связанной с неподвижной частью СА. По мере усадки шихтованных пакетов сердечника тарельчатые пружины СА будут распрямляться, перемещая при этом нажимное кольцо и соответственно изменяя зазор в измерительном конденсаторе. Измеряя емкость сенсора C_0 при зазоре d_0 (когда пружины сжаты) и емкость C_X при изменившемся во время хода пружин зазоре d_X , рассчитывают ход блока пружин ΔL :

$$\Delta L = d_0 - d_X = \pi \varepsilon_A \varepsilon_0 S \left(\frac{1}{C_0} - \frac{1}{C_X} \right), \quad (1)$$

где $\varepsilon = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; ε_A – относительная диэлектрическая проницаемость среды (воздуха); S – площадь проводящего слоя на диэлектрической пластине.

Недостатками предложенного в [10] устройства является необходимость применения специального трансформатора, вторичная обмотка которого наматывается экранированным кабелем, что дорого и нетехнологично особенно с учетом конструктивных особенностей СА и места монтажа измерительных преобразователей на ТГ.

К тому же в данном случае между сенсором и вторичным преобразователем необходимо использовать дорогой триаксиальный кабель (с двойным экраном). Указанные выше недостатки минимизируются в схемах с компланарными емкостными сенсорами.

Целью работы являлось обоснование возможности устранения указанных выше недостатков посредством применения многоэлементного емкостного сенсора с компланарными электродами для измерения хода тарельчатых пружин в силовых аккумуляторах систем стабилизации давления сердечника статора турбогенератора.

Результаты исследования

В данной работе для использования в качестве измерителя хода упомянутых пружин рассматривается емкостный сенсор с секторными компланарными электродами, вторичным преобразователем для которого можно использовать простой конвертор «емкость-код», выпускаемый в виде интегральной микросхемы, например ИМС фирмы *Analog Devices AD7745/46* [14].

На рисунке 1 представлена конструкция СА, в котором для измерения хода тарельчатых пружин предложено вместо емкостного сенсора с переменным зазором [10] использовать многоэлементный емкостный сенсор с компланарными электродами.

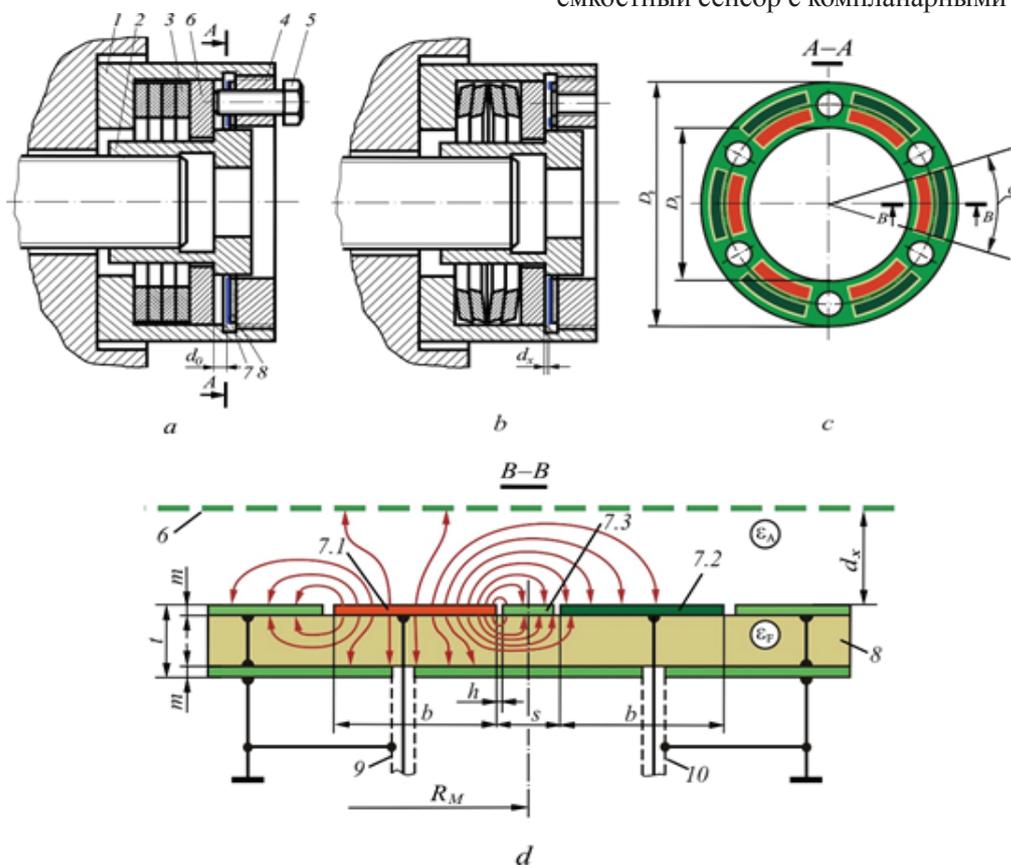


Рисунок 1 – Силовой аккумулятор с емкостным сенсором хода тарельчатых пружин: *a* – аккумулятор с полностью сжатыми тарельчатыми пружинами; *b* – аккумулятор с разжатыми тарельчатыми пружинами; *c* – многоэлементный емкостный сенсор с компланарными электродами; *d* – электрическое поле в емкостном сенсоре; *A-A* – поперечное сечение силового аккумулятора; *B-B* – радиальное сечение пластины емкостного сенсора; 1 – корпус СА; 2 – стяжная гайка; 3 – тарельчатые пружины; 4 – упорное кольцо; 5 – фиксирующие болты; 6 – металлическое нажимное кольцо; 7 – электропроводящий слой электродов емкостного сенсора; 7.1 – высокопотенциальный электрод сенсора; 7.2 – низкопотенциальный электрод сенсора; 7.3 – заземленный электрод сенсора; 8 – диэлектрическая пластина; 9, 10 – экранированные кабели

Figure 1 – The power accumulator with the capacitive motion sensor of cone disk springs: *a* – accumulator with fully compressed cone disc springs; *b* – accumulator with open cone disc springs; *c* – multi-element capacitive sensor with coplanar electrodes; *d* – electric field in a capacitive sensor; *A-A* – cross section of the power accumulator; *B-B* – radial section of capacitive sensor plate; 1 – body of power accumulator; 2 – coupling nut; 3 – cone disk springs; 4 – stop ring; 5 – fixing bolts; 6 – pressure ring; 7 – electrically conductive layer of electrodes of the capacitive sensor; 7.1 – high potential sensor electrode; 7.2 – low-potential sensor electrode; 7.3 – grounded electrode of the sensor; 8 – dielectric plate; 9, 10 – shielded cables

СА состоит из корпуса 1, гайки 2, тарельчатых пружин 3, упорного кольца 4, фиксирующих болтов 5, нажимного кольца 6 и диэлектрической пластины 8, которая жестко соединена с упорным кольцом 4. Пластина 8, которая выполнена в виде кольца с внутренним диаметром D_1 и внешним диаметром D_2 , содержит электропроводящий тонкий слой 7 (например, медный – при изготовлении пластины 8 из фольгированного диэлектрика).

В токопроводящем слое 7 сформированы (как правило, методом фотолитографии) элементарные емкостные сенсоры с компланарными электродами, которые являются частями концентрических колец (рисунок 1с, d). Разбивка концентрических колец на части (сектора) вызвана наличием отверстий для фиксирующих болтов. Угловой размер каждого i -го сенсора при этом равен α .

Каждая секция содержит один элементарный сенсор, который состоит из следующих основных частей: высокопотенциального электрода 7.1 шириной b , низкопотенциального электрода 7.2 такой же ширины b , между которыми размещен заземленный охранный электрод 7.3 шириной $(s-2h)$. Радиус средней линии электродов 7.1, 7.2 и 7.3 равен R_M (рисунок 1d). Электроды 7.1, 7.2 и 7.3 изолированы друг от друга тонкими промежутками, минимальная ширина h которых зависит от технологии изготовления и в исследуемом случае составила $h = 0,1$ мм. Картина электрического поля в радиальном сечении сенсора показана на рисунке 1d. Для того чтобы двумерное электрическое поле между электродами в каждом радиальном сечении элементарного сенсора было одинаковой формы, необходимо определить оптимальные соотношения между размерами b , s , R_M и α .

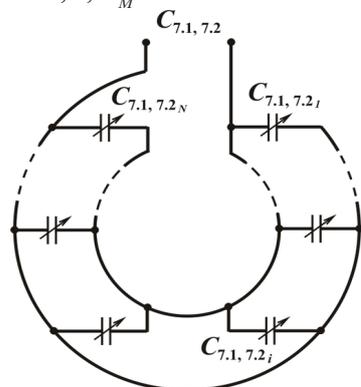


Рисунок 2 – Схема электрическая многоэлементного емкостного сенсора: $C_{7.1, 7.2i}$ – емкость элементарного компланарного сенсора

Figure 2 – Circuit diagram of an electric multi-cell capacitive sensor: $C_{7.1, 7.2i}$ – capacity of the elementary coplanar sensor

На рисунке 2 приведена электрическая схема многоэлементного емкостного сенсора.

При измерении общая электрическая емкость $C_{7.1, 7.2}$ сенсора определяется как сумма трех емкостей: емкости $C_{7.1, 7.2A}$ между электродами 7.1 и 7.2 через воздушный промежуток с диэлектрической проницаемостью ϵ_A , емкости $C_{7.1, 7.2F}$ между электродами 7.1 и 7.2 через стеклотекстолитовую подложку 8 с диэлектрической проницаемостью ϵ_F и паразитной емкости C_s (stray capacitance), обусловленной краевыми эффектами и емкостью линий связи между сенсором и вторичным измерительным преобразователем.

Емкость $C_{7.1, 7.2}$ изменяется с изменением расстояния d_x между общей плоскостью электродов 7.1, 7.1, 7.3 и торцевой поверхностью нажимного кольца 6, т.е. $C_{7.1, 7.2A} = f(d_x)$. Емкость $C_{7.1, 7.2F}$ является постоянной величиной ($C_{7.1, 7.2F} = \text{const}$). Каждая из указанных емкостей состоит из суммы емкостей соответствующих элементарных сенсоров и рассчитывается аналитически. Паразитная емкость C_s определяется экспериментальным путем.

Методы расчета электрической емкости сенсоров с системой компланарных электродов изложены во многих работах [15–26]. В основном исследуются сенсоры, которые применяются для неразрушающего контроля материалов при одностороннем доступе [16–19, 21–26], а в [19, 20] приведены результаты расчета емкостных компланарных сенсоров приближения. Так, работа [16] посвящена теоретическим основам создания сенсоров контроля полимерных материалов, [17] – сенсоров влажности ортотропных материалов (волокон, лент, бумаги, шпона и др.), [21] – сенсоров влажности человеческой кожи, [22] – сенсоров качества бетонных плит, [23] – сенсоров контроля композитных авиационных материалов, [24, 26] – сенсоров для исследования многослойных диэлектриков. К сожалению, результаты этих исследований применить для решения задачи измерения перемещений заземленной плоской поверхности относительно общей плоскости двух компланарных электродов невозможно.

Так как ширина b электродов 7.1 и 7.2 (рисунок 1) значительно меньше среднего радиуса R_M , то, условно считая их параллельными, применим для расчета емкости между этими электродами результаты работ [27, 28].

Для расчета емкостей $C_{7.1, 7.2A}$ и $C_{7.1, 7.2F}$ используем формулу по определению емкости C_L на единицу длины между двумя бесконечными

компланарными параллельными электродами, разделенными низкопотенциальным охранным электродом:

$$C_L = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d_x} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_x} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_x} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d_x}}, \quad (2)$$

где ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды; b – ширина электродов 7.1 и 7.2; s – расстояние между электродами 7.1 и 7.2; d_x – расстояния между общей плоскостью электродов 7.1, 7.2, 7.3 и торцевой поверхностью нажимного кольца 6.

Переменная емкость $C_{7.1, 7.2A}$ с учетом того, что длина суммарной средней линии между электродами 7.1 и 7.2 (рисунок 1с, d) равна $L_{7.1, 7.2} = N \cdot 2\pi R_M \frac{\alpha}{2\pi} = NR_M \alpha$, определяется как:

$$C_{7.1, 7.2A} = \varepsilon_0 \varepsilon_A \frac{\alpha}{\pi} NR_M \cdot \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d_x} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_x} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_x} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d_x}}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_A = 1,00056$ – диэлектрическая проницаемость воздуха; N – количество элементарных сенсоров; α – угловой размер элементарного сенсора; R_M – радиус средней линии размещения электродов 7.2, 7.2 и 7.3 по кольцу.

График функции $C_{7.1, 7.2A} = f(d_x)$ для значений: $N = 1$; $b = 7,5$ мм; $\alpha = 24^\circ$; $s = 1,4$ мм; $R_M = 65$ мм; $2 \text{ мм} \leq d_x \leq 6 \text{ мм}$ приведен на рисунке 3.

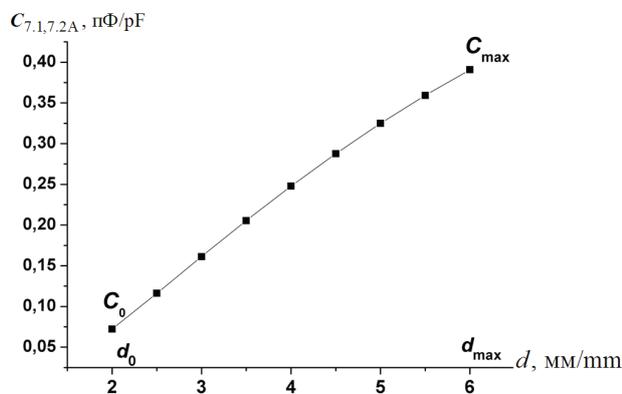


Рисунок 3 – График функции $C_{7.1, 7.2A} = f(d_x)$

Figure 3 – Graph of a function $C_{7.1, 7.2A} = f(d_x)$

Практические результаты использования СА на ТГ мощностью 200–500 МВт показали, что при стабилизации усилия прессования сердечника статора нажимная плита смещается на 3–5 мм [1]. Из анализа зависимости (3) можно сделать вывод, что сенсор с заданными геометрическими размерами может быть использован для измерения хода блока тарельчатых пружин равном 4 мм. При этом начальное расстояние между плоскостью электродов сенсора и торцом нажимного кольца 6 составит 2 мм, а максимальное – 6 мм (рисунок 3).

Постоянная емкость $C_{7.1, 7.2F}$ при изготовлении сенсора из фольгированного двустороннего стеклотекстолита общей толщиной $t = 1$ мм, толщиной медного слоя $m = 35$ мкм, учитывая то, что относительная диэлектрическая проницаемость стеклотекстолита $\varepsilon_F = 5,5$, будет равна:

$$C_{7.1, 7.2F} = \varepsilon_0 \varepsilon_F \frac{\alpha}{\pi} NR_M \cdot \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4(t-2m)} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(t-2m)} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(t-2m)} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4(t-2m)}} = 0,030028 \text{ пФ}. \quad (4)$$

На рисунке 4 показаны результаты метрологических исследований экспериментального образца сенсора при использовании автоматического моста переменного тока P5083 в качестве измерителя емкости. В результате проведенных исследований получена зависимость емкости сенсора $C_{7.1, 7.2}$ от расстояния d_x между плоскостью электродов и плоской заземленной металлической поверхностью (рисунок 4 кривая 1).

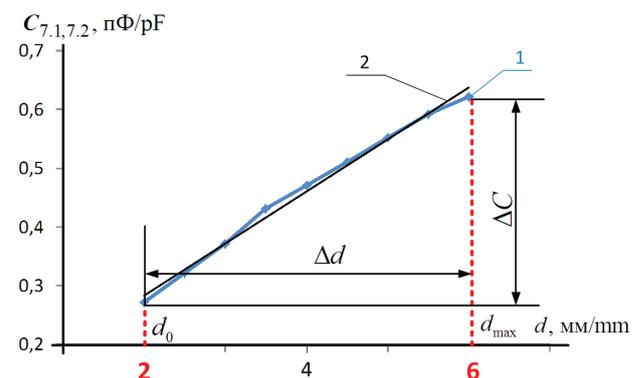


Рисунок 4 – Графики $C_{7.1, 7.2} = f(d_x)$: 1 – экспериментальные данные; 2 – аппроксимирующая зависимость $C_{7.1, 7.2} = 0,0884d_x + 0,1065$

Figure 4 – Graphs of the $C_{7.1, 7.2} = f(d_x)$: 1 – experimental data; 2 – approximating dependence $C_{7.1, 7.2} = 0,0884d_x + 0,1065$

Заключение

Обоснована возможность применения многоэлементного емкостного сенсора с компланарными электродами для измерения хода тарельчатых пружин в силовых аккумуляторах систем стабилизации давления сердечника статора турбогенератора. В результате аналитических и экспериментальных исследований получены результаты, которые дают возможность спроектировать сенсор для силовых аккумуляторов с различным ходом тарельчатых пружин.

Применение указанного сенсора позволяет:

- улучшить контроль давления прессовки сердечника статора турбогенератора;
- оценить распределение усилий в стяжных призмах сердечника статора;
- повысить надежность и продлить срок службы турбогенератора;
- снизить стоимость обслуживания системы стабилизации давления прессовки;
- получить возможность проведения контроля давления прессовки сердечника статора турбогенератора в процессе его эксплуатации;
- спроектировать сенсор такого типа для силовых аккумуляторов с различным ходом тарельчатых пружин.

Список использованных источников

1. Голоднова, О.С. Анализ и мероприятия по предупреждению повреждений сердечников статоров турбогенераторов / О.С. Голоднова, Г.В. Ростик // Сборник «Электросила». – СПб. : Электросила, 2004. – № 43. – С. 56–64.
2. Голоднова, О.С. О причинах повреждений торцевых зон сердечников статоров турбогенераторов и мерах по их предупреждению / О.С. Голоднова, Г.В. Ростик // Энергетик. – 2005. – № 1. – С. 17–20.
3. United States Patent No. 9,016,991 B2. Int. Cl. F16B 31/02, H02 K1/16, H02 K11/00, 3P 19/06, G01L 1/24, G01L 5/24, G01 D 5/353. Bolt tightener device for tightening a through-bolt in a generator core / Twerdochlib Michael (US), Edward David (US), Diatzikis Evangelos V. (US); Assignee Siemens Energy, Inc. (Orlando, FL, US) – Appl. no. 13/863,473; Date of Patent Apr. 28, 2015.
4. Sanjeev, D. Fabrication and Applications of Fiber Bragg Grating – A. Review / D. Sanjeev, G. Vikas, G. Amit // Advanced Engineering Technology and Application. – 2015. – No. 2. – P. 15–25. doi: 10.12785/aeta/040202
5. United States Patent No. 7,946,023 B2. Int. Cl. H02K 15/00, H02F 3/04, H01R 31/28. Method and

apparatus for measuring compression in a stator core / James Allan Cook (Orlando, FL, US), David T. Allen (Longwood, FL, US); Assignee Siemens Energy, Inc. (Orlando, FL, US) – Appl. no. 11/285,834; Date of Patent May 24, 2011.

6. Paspalovski, T. Replacement (reconstruction) of the active steel end zone of the turbogenerator / T. Paspalovski, N. Mojsoska, N. Jovanovski, V. Jovanovska, Z.V. Sovreski // Proceeding 1-st Global Conference, April 8–12, 2013. – P. 659–663.

7. Jovanovska, V. Increasing the Power of the Turbogenerator in the Process Of Modernization in the Mining and Energy Industry / V. Jovanovska, M. Arapcheska // International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. – 2015. – Vol. 2, iss. 2. – P. 162–166.

8. Минко, А.Н. Оптимальная геометрия и массогабаритные параметры конструкции корпуса статора турбогенераторов с воздушной системой охлаждения / А.Н. Минко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – № 1. – С. 33–39.

9. Зозулін, Ю.В. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій / Ю.В. Зозулін, О.С. Антонов, В.М. Бичік [та ін.]. – Х. : ПФ «Колегіум», 2011. – 228 с.

10. Левицкий, А.С. Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів / А.С. Левицкий, Г.М. Федоренко, О.П. Грубой. – К. : Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. – 242 с.

11. Иванов, В.В. О способе стабилизации плотности прессования активной стали турбогенераторов / В.В. Иванов, В.Н. Петров, Г.В. Ростик // Энергетик. – 2009. – № 8. – С. 29–30.

12. Paspalovski, T. Partial replacement of the active steel on the turbogenerator end zone / T. Paspalovski, V. Jovanovska // Termotechnika. – 2015. – XLI, 1. – P. 1–7.

13. Шевченко, В.В. Модернизация конструкций отечественных турбогенераторов с учетом требований поддержания их конкурентоспособности / В.В. Шевченко, А.Н. Минко // Вісник НТУ «ХП». – 2014. – № 38 (1081). – С. 146–155.

14. Неболюбов, Е.Ю. Электронные преобразователи для работы с емкостными датчиками (аналоговые и цифровые) / Е.Ю. Неболюбов, А.И. Новик // Техническая электродинамика. – 2015. – № 3. – С. 67–74.

15. Baxter, L.K. Capacitive Sensors: design and applications / L.K. Baxter. – New York : IEEE Press, 1997. – 320 с.

16. Mamishev, A.V. Interdigital Dielectrometry Sensor Design and Parameter Estimation Algorithms for Non-Destructive Materials Evaluation / A.V. Mamishev. – Cambridge : MIT, 1999. – 709 p.

17. Джежора, А.А. Электроемкостные преоб-

разователи и методы их расчета / А.А. Джежора. – Минск : Белорусская наука, 2008. – 305 с.

18. Xiaohui, H. Planar capacitive sensors – designs and applications / H. Xiaohui, Y. Wuqiang // *Sensor Review*. – 2010. – No. 30(1). – P. 24–39. doi: 10.1108/02602281011010772

19. Mamishev, A.V. Interdigital Sensors and Transducers / A.V. Mamishev, K. Sundara-Rajan, F. Yang, Y. Du, M. Zahn // *Proceeding of the IEEE*. – 2004. – Vol. 92, no. 5. – P. 808–845. doi: 10.1109/JPROC.2004.826603

20. Yong, Y. Novel Method for Proximity Detection of Moving Targets Using a Large-Scale Planar Capacitive Sensor System / Y. Yong, D. Jiahao, S. Sanmin, H. Zhuo, L. Yuting // *Sensors (Basel)*. – 2016. – No. 16(5): 699. doi: 10.3390/s16050699

21. Cheng, H. Analysis of a concentric coplanar capacitor for epidermal hydration sensing / H. Cheng, Z. Yihui, H. Xian, A.R. John, H. Yonggang // *Sensors and Actuators A203: Physical*. – 2013. – P. 149–153. doi: 10.1016/j.sna.2013.08.037

22. Amr, N.A. Improved interdigital sensors for structural health monitoring of composite retrofit systems / A.N. Amr, W. Wael // *Journal of Reinforced Plastics and Composite*. – 2011. – No. 30(7). – P. 621–629. doi: 10.1177/0731684411399944

23. Chen T. Capacitive sensors for measuring complex permittivity of planar and cylindrical structures: A dissertation of doctor of philosophy: Electrical Engineering / T. Chen. – Iowa State University, 2012. – 204 p.

24. Sheiretov, Y. Modeling of Spatially Periodic Dielectric Sensors in the Presence of a Top Ground Plane Bounding the Test Dielectric / Y. Sheiretov, M. Zahn // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2005. – Vol. 12, no. 5. – P. 993–1004. doi: 10.1109/TDEI.2005.1522192

25. Xiaobei, Li B. Design Principles for Multichannel Fringing Electric Field Sensors / X. Li, S. Larson, A. Zyuzin, A.V. Mamishev // *IEEE Sensors journal*. – 2006. – Vol. 6, no. 2. – P. 434–440. doi: 10.1109/JSEN.2006.870161

26. Chen, T. Analysis of a concentric coplanar capacitive sensor for nondestructive evaluation of multilayered dielectric structures / T. Chen, N. Bowler // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2010. – Vol. 17, iss. 4. – P. 1307–1318. doi: 10.1109/TDEI.2010.5539703

27. Gorbova, G.M. Analysis capacitance and linearity gauge characteristic of coplanar micro-displacement sensor / G.M. Gorbova, M.M. Gorbov, G.C. Meijer // *Proceeding XVII IMECO World Congress, June 22–27, 2003, Dubrovnic, Croatia*. – TC15. – P. 1965–1968.

28. Левіцький, А.С. Визначення функції перетворення ємнісного сенсора повітряного засто-

ру в гідрогенераторі СТК 538/160-70М / А.С. Левіцький, Є.О. Зайцев, Б.А. Кромпляс // *Пр. Ін-ту електродинаміки НАНУ : зб. наук. пр.* – К. : ІЕДНАНУ, 2016. – Вип. 43. – С. 134–136.

29. Srbulov M. *Ground Vibration Engineering: Simplified Analyses with Case Studies and Examples* / M. Srbulov. – Netherlands : Springer, 2010. – 233 p.

Reference

1. Golodnova O.S., Rostik G.V. [Analysis and measures to prevent damage to the cores of stators of turbogenerators]. *Elektrosila*, 2004, no. 43, pp. 56–64 (in Russian).

2. Golodnova O.S., Rostik G.V. [On the causes of damage to the end zones of the cores of stators of turbogenerators and measures for their prevention]. *Energetic*, 2005, no. 1, pp. 17–20 (in Russian).

3. Twerdochlib M., Edward D., Diatzikis E.V. Bolt tightener device for tightening a through-bolt in a generator core. Patent U.S. no. 9016991, 2015.

4. Sanjeev D., Vikas G., Amit G. Fabrication and Applications of Fiber Bragg Grating – A Review. *Advanced Engineering Technology and Application*, 2015, no. 2, pp. 15–25. doi: 10.12785/aeta/040202

5. Cook J.A., Allen D.T. Method and apparatus for measuring compression in a stator core. Patent U.S. no. 7946023, 2011.

6. Paspalovski T., Mojsoska N., Jovanovski N., Jovanovska V., Sovreski Z.V. Replacement (reconstruction) of the active steel end zone of the turbogenerator. *Proceeding 1-st Global Conference*, April 8–12, 2013, pp. 659–663.

7. Jovanovska V., Arapcheska M. Increasing the Power of the Turbogenerator in the Process of Modernization in the Mining and Energy Industry. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 2015, vol. 2, iss. 2, pp. 162–166.

8. Minko A.N. [Optimal geometry and mass-dimensional parameters of the stator housing structure of turbogenerators with an air cooling system]. *Energy saving. Power engineering. Energy audit.*, 2012, no. 1, pp. 33–39 (in Russian).

9. Zozulin Yu.V., Antonov O.E., Bichik V.M. & others. *Stvorenniya novykh typiv ta modernizatsiya diyuchykh turboheneratoriv dlya teplovykh elektrychnykh stantsiy* [Creation of new types and modernization of existing turbine generators for thermal power stations]. Kharkiv, PF «Collegium» Publ., 2011, 228 p. (in Ukrainian).

10. Levytskyi A.S., Fedorenko G.M., Gruboj O.P. *Kontrol stanu potuzhnykh hidro- ta turboheneratoriv za dopomohoyu yemnisnykh vymiryuvachiv paramet-riv mekhanichnykh defektiv* [Monitoring of the status

of powerful hydro and turbo generators using capacitive meter for the parameters of mechanical defects]. IED NANU Publ., 2011, 242 p. (in Ukrainian).

11. Ivanov V.V., Petrov V.N., Rostik G.V. [On the method of stabilizing the pressing density of the active steel of turbogenerators]. *Energetic*, 2009, no. 8, pp. 29–30 (in Russian).

12. Paspalovski T., Jovanovska V. Partial replacement of the active steel on the turbogenerator end zone. *Termotechnika*, 2015, XLI 1, pp. 1–7.

13. Shevchenko V.V., Minko A.N. [Modernization of domestic turbogenerator designs taking into account the requirements of maintaining their competitiveness]. *News of NTU «KhPI»*, 2014, no. 38 (1081), pp. 146–155 (in Russian).

14. Nebolyubov E.Yu., Novik A.I. [Electronic converters for working with capacitive sensors (analog and digital)]. *Technical Electrodynamics*, 2015, no. 3, pp. 67–74 (in Russian).

15. Baxter L.K. *Capacitive Sensors: design and applications*. New York, IEEE Press, 1997, 320 p.

16. Mamishev A.V. *Interdigital Dielectrometry Sensor Design and Parameter Estimation Algorithms for Non-Destructive Materials Evaluation*, Cambridge, MIT, 1999, 709 p.

17. Jezhora A.A. *Elektroemkostnye preobrazovately i metody ikh rascheta* [Electrocapacitance Transducers and Methods of Their Calculation], Minsk, Belarus. Nauka Publ., 2007, 305 p. (in Russian).

18. Xiaohui H., Wuqiang Y. Planar capacitive sensors – designs and applications. *Sensor Review*, 2010, no. 30(1), pp. 24–39. doi: 10.1108/02602281011010772

19. Mamishev A.V., Sundara-Rajan K., Yang F., Du Y., Zahn M. Interdigital Sensors and Transducers. *Proceeding of the IEEE*, 2004, vol. 92, no. 5, pp. 808–845. doi: 10.1109/JPROC.2004.826603

20. Yong Y., Jiahao D., Sanmin S., Zhuo H., Yuting L. Novel Method for Proximity Detection of Moving Targets Using a Large-Scale Planar Capacitive Sensor System. *Sensors (Basel)*, 2016, no. 16(5), pp. 1–17. doi: 10.3390/s16050699

21. Cheng H., Yihui Z., Xian H., John A.R., Yonggang H. Analysis of a concentric coplanar capacitor for epidermal hydration sensing. *Sensors and Actuators A203: Physical*, 2013, pp. 149–153. doi: 10.1016/j.sna.2013.08.037

22. Amr A.N., Wael W. Improved interdigital sensors for structural health monitoring of composite retrofit systems. *Journal of Reinforced Plastics and Composite*, 2011, no. 30(7), pp. 621–629. doi: 10.1177/0731684411399944

23. Chen T. Capacitive sensors for measuring complex permittivity of planar and cylindrical structures: A dissertation of doctor of philosophy: *Electrical Engineering*. Iowa State University, 2012, 204 p.

24. Sheiretov Y., Zahn M. Modeling of Spatially Periodic Dielectric Sensors in the Presence of a Top Ground Plane Bounding the Test Dielectric. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2005, vol. 12, no. 5, pp. 993–1004. doi: 10.1109/TDEI.2005.1522192

25. Li X., Larson S., Zyuzin A., Mamishev A.V. Design Principles for Multichannel Fringing Electric Field Sensors. *IEEE Sensors journal*, 2006, vol. 6, no. 2, pp. 434–440. doi: 10.1109/JSEN.2006.870161

26. Chen T., Bowler N. Analysis of a concentric coplanar capacitive sensor for nondestructive evaluation of multilayered dielectric structures. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2010, vol. 17, iss. 4, pp. 1307–1318. doi: 10.1109/TDEI.2010.5539703

27. Gorbova G., Gorbov M., Meijer G.C. Analysis capacitance and linearity gauge characteristic of coplanar microdisplacement sensor. *Proceeding XVII IMECO World Congress*, 2003, TC15, pp. 1965–1968.

28. Levytskyi A.S., Zaitsev I.O., Kromplyas B.A. [Determination of the response characteristic of the capacitive sensor of the air gap in the hydrogenerator SGK 538/160-70M]. *Pratsi Institutu elektrodinamiki Nacional'noji akademiji nauk Ukraini*, 2016, no. 43, pp. 134–137 (in Ukrainian).

29. Srbulov M. *Ground Vibration Engineering: Simplified Analyses with Case Studies and Examples*. Netherlands., Springer Publ., 2010, 233 p.

УДК 517.958:537.311.1; 621.315.592

Расчет статических параметров кремниевого диода, содержащего в симметричном p – n -переходе δ -слой точечных трехзарядных дефектов

Поклонский Н.А., Ковалев А.И., Горбачук Н.И., Шпаковский С.В.

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

Поступила 10.05.2018

Принята к печати 01.06.2018

Научный и практический интерес представляет изучение полупроводниковых материалов и приборов с узким слоем атомов примесей и/или собственных точечных дефектов кристаллической решетки. Цель работы – рассчитать электрические параметры симметричного кремниевого диода, в плоском p – n -переходе которого сформирован δ -слой точечных трехзарядных t -дефектов. Такой диод называется p – t – n -диодом, подобно p – i – n -диоду.

Каждый t -дефект может находиться в одном из трех зарядовых состояний (-1 , 0 , $+1$; в единицах элементарного заряда). Считается, что при комнатной температуре все водородоподобные акцепторы в p -области и водородоподобные доноры в n -области ионизованы. Принималось, что сечение захвата дырок v -зоны на t -дефекты больше сечения захвата электронов c -зоны на t -дефекты.

Численно решена система стационарных нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих в дрейфово-диффузионном приближении миграцию электронов и дырок в полупроводниках. Рассчитаны статические вольт-фарадные и вольт-амперные характеристики кремниевого диода с невырожденными областями p - и n -типа электропроводности при прямом и обратном электрическом напряжении смещения.

Расчетным путем показано, что в p – t – n -диоде, содержащем δ -слой t -дефектов, при прямом смещении имеется участок стабилизации плотности тока. При обратном смещении плотность тока в таком диоде много больше, чем в p – n -диоде без t -дефектов. При увеличении обратного смещения емкость p – t – n -диода, в отличие от p – n -диода, вначале увеличивается, а затем уменьшается.

Ключевые слова: кремний, p – n -переход, δ -слой точечных дефектов, вольт-амперная характеристика, вольт-фарадная характеристика.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-130-141

Адрес для переписки:

Поклонский Н.А.
Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: poklonski@bsu.by; poklonski@tut.by

Address for correspondence:

Poklonski N.A.
Belarusian State University,
Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: poklonski@bsu.by; poklonski@tut.by

Для цитирования:

Поклонский Н.А., Ковалев А.И., Горбачук Н.И., Шпаковский С.В.
Расчет статических параметров кремниевого диода, содержащего в симметричном p – n -переходе δ -слой точечных трехзарядных дефектов. Приборы и методы измерений. 2018. – Т. 9, № 2. – С. 130–141.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-130-141

For citation:

Poklonski N.A., Kovalev A.I., Gorbachuk N.I., Shpakovski S.V.
[Calculation of static parameters of silicon diode containing δ -layer of point triple-charged defects in symmetric p – n -junction].
Devices and Methods of Measurements. 2018, vol. 9, no. 2, pp. 130–141 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-130-141

Calculation of static parameters of silicon diode containing δ -layer of triple-charged point defects in symmetric p – n -junction

Poklonski N.A., Kovalev A.I., Gorbachuk N.I., Shpakovski S.V.

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

Received 10.05.2018

Accepted for publication 01.06.2018

Abstract

The study of semiconductor materials and devices containing a narrow layer of impurity atoms and/or intrinsic point defects of the crystal lattice is of fundamental and practical interest. The aim of the study is to calculate the electric parameters of a symmetric silicon diode, in the flat p – n -junction of which a δ -layer of point triple-charged t -defects is formed. Such a diode is called p – t – n -diode, similarly to p – i – n -diode.

Each t -defect can be in one of the three charge states (-1 , 0 , and $+1$; in the units of the elementary charge). It is assumed that at room temperature all hydrogen-like acceptors in p -region and hydrogen-like donors in n -region are ionized. It was assumed that the cross-section for v -band hole capture on t -defects is greater than the cross-section for c -band electron capture on t -defects.

The system of stationary nonlinear differential equations, which describe in the drift-diffusion approximation a migration of electrons and holes in semiconductors, is solved numerically. The static capacity-voltage and current-voltage characteristics of the silicon diode with nondegenerate regions of p - and n -type of electrical conductivity are calculated for forward and reverse electric bias voltage.

It is shown by calculation that in the p – t – n -diode containing the δ -layer of t -defects, at the forward bias a region of current density stabilization occurs. At the reverse bias the current density in such a diode is much greater than the one in a p – n -diode without t -defects. With the reverse bias the capacitance of the p – t – n -diode, in contrast to the p – n -diode, increases at first and then decreases.

Keywords: silicon, p – n -junction, δ -layer of point defects, current-voltage characteristic, capacity-voltage characteristic.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-130-141

Адрес для переписки:

Поклонский Н.А.
Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: poklonski@bsu.by; poklonski@tut.by

Address for correspondence:

Poklonski N.A.
Belarusian State University,
Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: poklonski@bsu.by; poklonski@tut.by

Для цитирования:

Поклонский Н.А., Ковалев А.И., Горбачук Н.И., Шпаковский С.В.
Расчет статических параметров кремниевого диода, содержащего в симметричном p – n -переходе δ -слой точечных трехзарядных дефектов.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 2. – С. 130–141.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-130-141

For citation:

Poklonski N.A., Kovalev A.I., Gorbachuk N.I., Shpakovski S.V.
[Calculation of static parameters of silicon diode containing δ -layer of point triple-charged defects in symmetric p – n -junction].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 2, pp. 130–141 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-130-141

Введение

Свойства полупроводников, содержащих дефекты кристаллической структуры, существенно зависят от типа дефектов, их концентрации и пространственного распределения. Научный и практический интерес представляет изучение полупроводниковых материалов и приборов с узким слоем атомов примесей и/или собственных точечных дефектов кристаллической решетки [1–3]. Это объясняется тем, что такие структуры являются малоизученными (с теоретической точки зрения) и порой приводят к явным разногласиям в трактовке результатов экспериментов. Так, в работе [4] утверждается, что формирование слоя дефектов вблизи плоского p – n -перехода имплантацией протонов в кремниевый диод повышает эффективность преобразования солнечного излучения таким диодом до 35%. Однако в работе [5] опровергают данное заявление и утверждают, что эффективность такого диода не увеличивается. Напротив – напряжение холостого хода уменьшается на 20% из-за увеличения темпа рекомбинации генерируемых светом электронов и дырок через уровни энергии дефектов в области p – n -перехода.

Как правило, создание полупроводниковых приборных структур и экспериментальное определение их параметров – длительный процесс, который не всегда позволяет достичь результатов в пределах желаемого. Поэтому для исследования таких структур используют математическое моделирование [6, 7].

Цель работы – рассчитать статические электрические параметры кремниевого диода, содержащего в двойном электрическом слое δ -слой точечных трехзарядных двухуровневых (без учета возбужденных состояний) дефектов кристаллической матрицы.

Модель симметричного p – t – n -диода

Рассмотрим одномерную модель диода, сформированного в кристаллическом кремнии. Длина диода L , плоский «металлургический» p – n -переход ($N_a = N_d$) расположен в точке с координатой $x = 0$ (рисунок 1). При $x < -L/2$ находится p^+ -контакт к p -области, при $x > L/2$ находится n^+ -контакт к n -области. В области объемного заряда (двойного электрического слоя) p – n -перехода создан δ -слой двухуровневых t -дефектов, каждый из которых может находиться в одном из трех зарядовых состояний ($-1, 0, +1$).

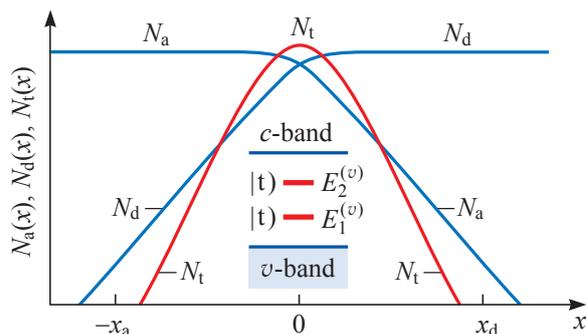


Рисунок 1 – Схема распределения по координате x водородоподобных акцепторов N_a , доноров N_d и t -дефектов N_t с уровнями энергии $E_2^{(v)} > E_1^{(v)} > 0$ относительно потолка v -зоны кремния; $x_a + x_d > 0$ – толщина двойного электрического слоя p – n -перехода

Figure 1 – Scheme of distribution over coordinate x of hydrogen-like acceptors N_a , donors N_d and t -defects N_t with the energy levels $E_2^{(v)} > E_1^{(v)} > 0$ relative to the top of v -band of silicon; $x_a + x_d > 0$ is the width of the double electrical layer of p – n -junction

Полагаем, что все водородоподобные акцепторы $|ap\rangle$ и доноры $|dn\rangle$ с концентрациями $N_a(x)$ и $N_d(x)$ неподвижны и полностью ионизованы, т. е. находятся в зарядовых состояниях (-1) и ($+1$) соответственно, а их распределение по координате x вдоль диода определяется так [8]:

$$N_a(x) = \frac{N_a}{1 + \exp(x/l)}, \quad N_d(x) = \frac{N_d}{1 + \exp(-x/l)}, \quad (1)$$

где l – параметр профиля легирования, N_d и N_a – максимальные концентрации доноров и акцепторов в пределе $l \rightarrow 0$.

Пусть t -дефекты неподвижны и имеют нормальное (гауссово) распределение вдоль диода с максимумом в точке металлургического перехода ($x = 0$; см. рисунок 1):

$$N_t(x) = N_t(0) \exp[-(x/\Delta)^2], \quad (2)$$

где $N_t(x) = N_{t,-1}(x) + N_{t,0}(x) + N_{t,+1}(x)$ – полная концентрация t -дефектов в трех зарядовых состояниях ($-1, 0, +1$); Δ – параметр профиля распределения t -дефектов в δ -слое; $N_t(0)$ – концентрация t -дефектов в центре p – t – n -диода (при $x = 0$). Ясно, что подобные t -дефекты кремниевой матрицы должны быть термически устойчивы до температур немного больше 500 К для обеспечения стабильных параметров диодов в рабочем диапазоне температур (см., например, [9, 10]).

Зарядовые состояния неподвижных t -дефектов в δ -слое становятся условно подвижными за счет обмена электронами между t -дефектами,

а также за счет захвата электронов из зоны проводимости (c -зоны) и дырок из валентной зоны (v -зоны) и теплового выброса их обратно [11].

Вероятность нахождения t -дефектов в трех зарядовых состояниях $(-1, 0, +1)$ определяется соответствующими функциями [12]:

$$f_{t,-1}(\varphi(x)) = \left[1 + \gamma_2 \exp\left(\frac{E_2^{(v)} + E_F^{(v)}(\varphi(x))}{k_B T}\right) + \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \exp\left(\frac{E_1^{(v)} + E_2^{(v)} + 2E_F^{(v)}(\varphi(x))}{k_B T}\right) \right]^{-1},$$

$$f_{t,0}(\varphi(x)) = \left[1 + \gamma_1^{-1} \exp\left(\frac{E_1^{(v)} + E_F^{(v)}(\varphi(x))}{k_B T}\right) + \gamma_2^{-1} \exp\left(\frac{-E_2^{(v)} - E_F^{(v)}(\varphi(x))}{k_B T}\right) \right]^{-1},$$

$$f_{t,+1}(\varphi(x)) = \left[1 + \gamma_1 \exp\left(\frac{-E_1^{(v)} - E_F^{(v)}(\varphi(x))}{k_B T}\right) + \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \exp\left(\frac{-E_1^{(v)} - E_2^{(v)} - 2E_F^{(v)}(\varphi(x))}{k_B T}\right) \right]^{-1}, \quad (3)$$

где γ_1, γ_2 – факторы вырождения уровней энергии t -дефектов $E_1^{(v)} > 0, E_2^{(v)} > 0$ (далее $\gamma_1 = \gamma_2 = 1$); $\varphi(x)$ – распределение электрического потенциала вдоль диода (по координате x); k_B – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Введем обозначения: $N_{t,-1}(x, \varphi(x)) \equiv N_{t,-1}(x)$; $N_{t,0}(x, \varphi(x)) \equiv N_{t,0}(x)$; $N_{t,+1}(x, \varphi(x)) \equiv N_{t,+1}(x)$. Тогда с учетом (1) и (2) формулы для концентраций t -дефектов в зарядовых состояниях $(-1, 0, +1)$ принимают вид [12, 13]:

$$N_{t,-1}(x) = N_t(x) f_{t,-1}(\varphi(x));$$

$$N_{t,0}(x) = N_t(x) f_{t,0}(\varphi(x));$$

$$N_{t,+1}(x) = N_t(x) f_{t,+1}(\varphi(x)). \quad (4)$$

Энергетическая зонная диаграмма диода, содержащего δ -слой t -дефектов, показана на рисунке 2. Уровни энергии t -дефектов $E_1^{(v)} > 0, E_2^{(v)} > 0$ и уровень Ферми (электрохимический потенциал для электронов) $E_F^{(v)} < 0$ отсчитываются от потолка v -зоны $E_v(x)$. Положение уровня Ферми $E_F^{(v)}(x) = -[E_g + E_F^{(c)}(x)]$ вдоль p - t - n -диода определяется выражением (см., например, [12, 13]):

$$E_F^{(v)}(x) \equiv E_F^{(v)}(\varphi(x)) = E_F^{(v)}(-L/2) - e\varphi(x), \quad (5)$$

где $E_F^{(v)}(-L/2) < 0$ – уровень Ферми на левой границе диода в p -области; e – элементарный электрический заряд.

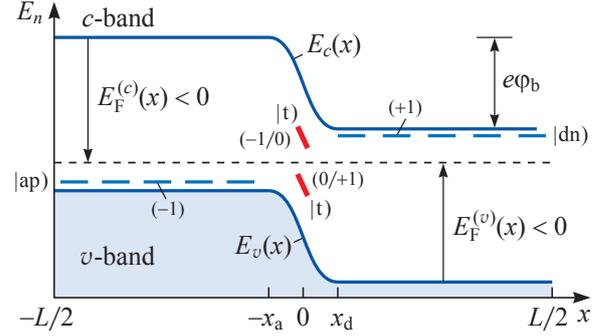


Рисунок 2 – Зонная диаграмма (зависимость одноэлектронной энергии E_n от координаты x) p - t - n -диода в равновесии: $E_c(x), E_v(x)$ – уровни энергии дна c -зоны и потолка v -зоны; $E_g = E_c(x) - E_v(x) > 0$ – ширина запрещенной зоны; $|ap\rangle$ – акцепторы в зарядовом состоянии (-1) ; $|dn\rangle$ – доноры в зарядовом состоянии $(+1)$; $|t\rangle$ – t -дефекты с уровнями энергии $E_1^{(v)}$ [зарядовые состояния $(0, +1)$] и $E_2^{(v)}$ [зарядовые состояния $(-1, 0)$]; $E_F^{(v)}(x) = -[E_g + E_F^{(c)}(x)] < 0$ – уровень Ферми; $e\varphi_b > 0$ – энергетический барьер p - n -перехода; L – длина диода

Figure 2 – Band diagram (dependence of the single-electron energy E_n on the coordinate x) of p - t - n -diode in equilibrium: $E_c(x), E_v(x)$ are the energy levels of the bottom of c -band and the top of v -band; $E_g = E_c(x) - E_v(x) > 0$ is the band gap; $|ap\rangle$ are acceptors in the charge state (-1) ; $|dn\rangle$ are donors in the charge state $(+1)$; $|t\rangle$ are t -defects with energy levels $E_1^{(v)}$ [the charge states $(0, +1)$] and $E_2^{(v)}$ [the charge states $(-1, 0)$]; $E_F^{(v)}(x) = -[E_g + E_F^{(c)}(x)] < 0$ is the Fermi level; $e\varphi_b > 0$ is the energy barrier of p - n -junction; L is the diode length

Энергетический барьер $e\varphi_b$ в диоде для электронов c -зоны и дырок v -зоны является следствием термодинамического равновесия между процессами дрейфа и диффузии носителей заряда в области металлургического перехода. Величина $e\varphi_b$ определяется разностью уровней Ферми на границах диода:

$$e\varphi_b = E_F^{(v)}(-L/2) - E_F^{(v)}(L/2) = E_F^{(c)}(L/2) - E_F^{(c)}(-L/2) > 0, \quad (6)$$

где φ_b – контактная разность электрических потенциалов диода в отсутствие электрического тока (в термодинамическом равновесии).

Чтобы найти положение уровня Ферми $E_F^{(v)}$ на границах p - и n -областей относительно потолка v -зоны для невырожденного полупроводника, составим соответствующие уравнения электрической нейтральности:

$$n(x) + N_a(x) + N_{t,-1}(x) = p(x) + N_{t,+1}(x) \quad \text{при } x = -L/2,$$

$$n(x) + N_{t,-1}(x) = p(x) + N_d(x) + N_{t,+1}(x) \quad \text{при } x = L/2, \quad (7)$$

где $n(x) = n_c \exp[-(E_g + E_F^{(v)}(x))/k_B T]$ – концентрация электронов в зоне проводимости; $n_c = 2[2\pi m_n k_B T / (2\pi\hbar)^2]^{3/2}$; $p(x) = p_v \exp(E_F^{(v)}(x)/k_B T)$ – концентрация дырок в валентной зоне; $p_v = 2[2\pi m_p k_B T / (2\pi\hbar)^2]^{3/2}$; m_n, m_p – эффективные массы плотности состояний для электронов c -зоны и дырок v -зоны, $\hbar = h/2\pi$ – постоянная Планка.

В соотношениях (7) учтено, что концентрации дырок и электронов на границах диода (на p^+ и n^+ омических контактах) определяются концентрациями водородоподобных примесей и t -дефектов.

Дрейфово-диффузионная модель миграции электронов и дырок в диоде

Плотности электронного $J_n(x)$ и дырочного $J_p(x)$ токов имеют вид (см., например, [12, 13]):

$$\begin{aligned} J_n(x) &= en(x)\mu_n E(x) + eD_n \frac{dn(x)}{dx}, \\ J_p(x) &= ep(x)\mu_p E(x) - eD_p \frac{dp(x)}{dx}, \end{aligned} \quad (8)$$

где μ_n, μ_p – дрейфовые подвижности электронов (n) и дырок (p) соответственно; $E(x)$ – напряженность электрического поля; D_n, D_p – коэффициенты диффузии.

Связь между коэффициентом диффузии $D_{n(p)}$ и дрейфовой подвижностью $\mu_{n(p)}$ в условиях термодинамического равновесия для невырожденного газа электронов c -зоны (n) и дырок v -зоны (p) дается соотношением Нернста–Эйнштейна [14]:

$$\frac{D_{n(p)}}{\mu_{n(p)}} = \frac{k_B T}{e}. \quad (9)$$

В работе [15] предложена аппроксимация, позволяющая вычислять подвижность основных носителей заряда в кристаллических полупроводниковых материалах в широком диапазоне температур T и концентраций водородоподобных доноров N_d (или акцепторов N_a), в виде:

$$\begin{aligned} \mu_{n(p)}(N_{d(a)}, T) &= \\ &= \mu_{\max}^{n(p)}(T_0) \frac{B_{n(p)}(N_{d(a)}) [T/T_0]^{\beta_{n(p)}}}{1 + B_{n(p)}(N_{d(a)}) [T/T_0]^{(\delta_{n(p)} + \beta_{n(p)})}}, \end{aligned} \quad (10)$$

где $B_{n(p)}(N_{d(a)}) = \frac{\mu_{\min}^{n(p)} + \mu_{\max}^{n(p)} [N_g^{n(p)} / N_{d(a)}]^{\gamma_{n(p)}}}{\mu_{\max}^{n(p)} - \mu_{\min}^{n(p)}} \Big|_{T=T_0}$;

$T_0 = 300$ К. Для расчета подвижности электронов в n -области (индекс n) и дырок в p -области (индекс p) кристаллического кремния исполь-

зуются константы:

$$\begin{aligned} \mu_{\max}^n &= 1414 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}, \quad \mu_{\min}^n = 68,5 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}, \\ \mu_{\max}^p &= 470,5 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}, \quad \mu_{\min}^p = 44,9 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}, \\ N_g^n &= 9,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}, \quad N_g^p = 2,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}, \\ \beta_n &= 0,26, \quad \delta_n = 2,42, \quad \gamma_n = 0,71, \\ \beta_p &= 0,36, \quad \delta_p = 2,20, \quad \gamma_p = 0,72. \end{aligned}$$

Вначале по формуле (10) вычисляются дрейфовые подвижности электронов и дырок, затем по (9) – их коэффициенты диффузии.

Напряженность электрического поля в диоде

Напряженность стационарного электрического поля в диоде $E(x)$ определяется из уравнения Пуассона (см., например, [11–13]):

$$\begin{aligned} \frac{dE(x)}{dx} &= \frac{\rho(x)}{\epsilon_r \epsilon_0} = \frac{e}{\epsilon_r \epsilon_0} [p(x) + N_d(x) + N_{t,+1}(x, \varphi(x)) - \\ &- n(x) - N_a(x) - N_{t,-1}(x, \varphi(x))], \end{aligned} \quad (11)$$

где $\rho(x)$ – распределение объемной плотности электрического заряда вдоль диода; $\epsilon_r = 11,5$ – относительная диэлектрическая проницаемость кремния; $\epsilon_0 = 8,85$ пФ/м – электрическая постоянная; $N_a(x)$ и $N_d(x)$ определяются по (1); концентрации t -дефектов в зарядовых состояниях (-1) и ($+1$) зависят, согласно формулам (2) и (3), не только от x , но и от электрического потенциала $\varphi(x)$.

Напряженность стационарного поля $E(x)$, потенциал $\varphi(x)$ и постоянное внешнее напряжение U на диоде связаны соотношениями:

$$\frac{d\varphi(x)}{dx} = -E(x); \quad U - \varphi_b = \int_{-L/2}^{L/2} E(x) dx. \quad (12)$$

Генерационно-рекомбинационные процессы в области p – n -перехода

При возбуждении стационарного тока в p – t – n -диоде изменяется концентрация электронов c -зоны и дырок v -зоны (относительно их равновесных значений), а также происходит перераспределение t -дефектов по зарядовым состояниям ($Z = -1, 0, +1$; в единицах элементарного заряда e). Так, в зарядовом состоянии (0) концентрация t -дефектов: 1) уменьшается вследствие захвата ими электронов из c -зоны или дырок из v -зоны, а также теплового выброса их t -дефектами в зарядовом состоянии (0) в зоны, 2) увеличивается при захвате электронов и вы-

бросе дырок t -дефектами в зарядовом состоянии (+1), а также при захвате дырок и выбросе электронов t -дефектами в зарядовом состоянии (–1).

В стационарном случае для описания генерационно-рекомбинационных процессов в p – n -переходе, содержащем δ -слой t -дефектов, запишем уравнения непрерывности [11, 13, 16]:

$$\begin{aligned} \frac{dJ_n(x)}{dx} &= -e[G_n(t, 0) - R_n(t, +1) + \\ &+ G_n(t, -1) - R_n(t, 0) + G_{np} - R_{np}], \\ \frac{dJ_p(x)}{dx} &= e[G_p(t, +1) - R_p(t, 0) + \\ &+ G_p(t, 0) - R_p(t, -1) + G_{np} - R_{np}], \end{aligned} \quad (13)$$

где $G_n(t, Z)$ – скорость (темп) теплового выброса t -дефектами (в зарядовом состоянии Z) электронов в c -зону, $G_p(t, Z)$ – скорость теплового выброса t -дефектами (в зарядовом состоянии Z) дырок в v -зону (т. е. захвата электронов из v -зоны на t -дефекты), G_{np} – скорость межзонной тепловой генерации электронов и дырок, $R_n(t, Z)$ – скорость теплового захвата на t -дефекты в зарядовом состоянии Z электронов из c -зоны, $R_p(t, Z)$ – скорость теплового захвата на t -дефекты в зарядовом состоянии Z дырок из v -зоны (т. е. выброса электронов t -дефектами в v -зону), R_{np} – скорость межзонной рекомбинации электронов и дырок,

$$\begin{aligned} G_n(t, 0) &= \beta_{t,n} N_{t,0}(x) = \alpha_{t,n} N_{t,0}(x) \left[n(x) \frac{N_{t,+1}(x)}{N_{t,0}(x)} \right]_{\text{eq}}; \\ R_n(t, +1) &= \alpha_{t,n} n(x) N_{t,+1}(x); \\ G_n(t, -1) &= \beta_{t,n} N_{t,-1}(x) = \alpha_{t,n} N_{t,-1}(x) \left[n(x) \frac{N_{t,0}(x)}{N_{t,-1}(x)} \right]_{\text{eq}}; \\ R_n(t, 0) &= \alpha_{t,n} n(x) N_{t,0}(x); \\ G_p(t, +1) &= \beta_{t,p} N_{t,+1}(x) = \alpha_{t,p} N_{t,+1}(x) \left[p(x) \frac{N_{t,0}(x)}{N_{t,+1}(x)} \right]_{\text{eq}}; \\ R_p(t, 0) &= \alpha_{t,p} p(x) N_{t,0}(x); \\ G_p(t, 0) &= \beta_{t,p} N_{t,0}(x) = \alpha_{t,p} N_{t,0}(x) \left[p(x) \frac{N_{t,-1}(x)}{N_{t,0}(x)} \right]_{\text{eq}}; \\ R_p(t, -1) &= \alpha_{t,p} p(x) N_{t,-1}(x); \\ G_{np} &= \beta_{np} = \alpha_{np} [n(x)p(x)]_{\text{eq}} = \alpha_{np} n_i^2; \\ R_{np} &= \alpha_{np} n(x)p(x); \end{aligned}$$

α_{np} – коэффициент межзонной рекомбинации; β_{np} – скорость (темп) межзонной генерации; $\alpha_{t,n}$ и $\alpha_{t,p}$ – коэффициенты захвата t -дефектом электрона из c -зоны и дырки из v -зоны; $\beta_{t,n}$ и $\beta_{t,p}$ – коэффициенты теплового выброса электрона в c -зону и дырки в v -зону из t -дефекта. Индексом

eq обозначены равновесные значения величин, т. е. в отсутствие тока ($J_n = J_p = 0$) и внешнего электрического напряжения ($U = 0$), $n_i = p_i = [n_c p_v \exp(-E_g/k_B T)]^{1/2}$ – концентрации электронов n_i и дырок p_i в собственном полупроводнике; $N_{t,-1}(x)$, $N_{t,0}(x)$, $N_{t,+1}(x)$ по (2) и (3) зависят не только от x , но и от $\varphi(x)$.

В стационарном состоянии (как в отсутствие, так и при возбуждении тока в p – t – n -диоде) зарядовые состояния t -дефектов удовлетворяют уравнениям баланса [11, 17]:

$$\begin{aligned} \frac{dN_{t,-1}(x)}{dt} &= R_n(t, 0) - G_n(t, -1) + \\ &+ G_p(t, 0) - R_p(t, -1) + G_{tt} - R_{tt} = 0, \\ \frac{dN_{t,0}(x)}{dt} &= R_n(t, +1) + G_p(t, +1) + \\ &+ R_p(t, -1) + G_n(t, -1) - R_n(t, 0) - G_n(t, 0) - \\ &- R_p(t, 0) - G_p(t, 0) - 2(G_{tt} - R_{tt}) = 0, \\ \frac{dN_{t,+1}(x)}{dt} &= R_p(t, 0) - G_p(t, +1) + \\ &+ G_n(t, 0) - R_n(t, +1) + G_{tt} - R_{tt} = 0, \end{aligned} \quad (14)$$

где t – время; $G_{tt} = \beta_t [N_{t,0}(x)]^2$ – средняя скорость термически ассистированного перехода электрона между соседними t -дефектами в зарядовых состояниях (0); $R_{tt} = \alpha_t N_{t,-1}(x) N_{t,+1}(x)$ – средняя скорость (темп) перехода электрона с t -дефекта в зарядовом состоянии (–1) на соседний t -дефект в зарядовом состоянии (+1); β_t и α_t – коэффициенты взаимной тепловой ионизации и нейтрализации двух t -дефектов; см. также обозначения к системе уравнений (13). Так как $N_{t,-1}(x) + N_{t,0}(x) + N_{t,+1}(x) = N_t(x)$ не зависит от времени, то $dN_t(x)/dt = 0$. Вкладом локальной прыжковой миграции электронов между t -дефектами [8] в полную плотность тока $J = J_n(x) + J_p(x)$ пренебрегаем.

Для переходов электронов из v -зоны в c -зону и обратно коэффициент α_{np} определяется согласно [13, 16] по формуле $\alpha_{np} = (2\tau_i n_i)^{-1}$, где τ_i – время жизни электронов в c -зоне и дырок в v -зоне, ограниченное их межзонной рекомбинацией.

Коэффициенты захвата электронов c -зоны и дырок v -зоны на t -дефекты рассчитываются согласно [18]: $\alpha_{t,n} = v_n S_n$, $\alpha_{t,p} = v_p S_p$, где $S_{n(p)}$ – сечение захвата электронов (дырок); $v_{n(p)} = (8k_B T / \pi m_{nc(pc)})^{1/2}$ – средняя тепловая скорость в невырожденном газе электронов (дырок) [12], $m_{nc} = 0,259m_0$ и $m_{pc} = 0,397m_0$ – эффективные массы электропроводности для электронов и дырок.

Следуя работам [8, 19], коэффициент захвата α_t одного электрона с t -дефекта в зарядовом состоянии (-1) на ближайший к нему по расстоянию t -дефект в зарядовом состоянии $(+1)$ можно записать в виде: $\alpha_t = v_{it}/N_t(x)$, где $v_{it} \approx 10$ ТГц – характерная частота фононов кристаллической матрицы. Связь между коэффициентами тепловой ионизации β_t и захвата α_t записывается в виде: $\beta_t/\alpha_t = (1/\gamma_1\gamma_2) \exp[(E_1^{(v)} - E_2^{(v)})/k_B T]$, где $\gamma_1 \approx \gamma_2$ – факторы вырождения двух уровней энергии ($E_2^{(v)} > E_1^{(v)} > 0$) t -дефектов (далее $\gamma_1 = \gamma_2 = 1$).

Система дифференциальных уравнений

В дрейфово-диффузионном приближении (см., например, [11, 13, 20]) стационарные процессы миграции электронов и дырок в p - n -переходе, где сформирован δ -слой t -дефектов, описываются системой дифференциальных уравнений (см. уравнения (8), (12), (13)):

$$\begin{aligned} \frac{dn(x)}{dx} &= -n(x) \frac{eE(x)}{k_B T} + \frac{J_n(x)}{eD_n}, \\ \frac{dp(x)}{dx} &= p(x) \frac{eE(x)}{k_B T} - \frac{J_p(x)}{eD_p}, \\ \frac{d\varphi(x)}{dx} &= -E(x), \\ \frac{dE(x)}{dx} &= \frac{\rho(x)}{\varepsilon_r \varepsilon_0} = \frac{e}{\varepsilon_r \varepsilon_0} [p(x) + N_d(x) + N_{t,+1}(x) - \\ &\quad - n(x) - N_a(x) - N_{t,-1}(x)], \\ \frac{dJ_n(x)}{dx} &= -e [G_p(t,+1) - R_p(t,0) + \\ &\quad + G_n(t,-1) - R_n(t,0) + G_{np} - R_{np} - G_{tt} + R_{tt}], \\ \frac{dJ_p(x)}{dx} &= e [G_p(t,+1) - R_p(t,0) + \\ &\quad + G_n(t,-1) - R_n(t,0) + G_{np} - R_{np} - G_{tt} + R_{tt}]. \end{aligned} \quad (15)$$

Зная решение системы (15), можно найти распределение концентраций электронов и дырок вдоль диода, распределение электрического потенциала $\varphi(x)$ и напряженности электрического поля $E(x)$, а также распределение плотностей электронного $J_n(x)$ и дырочного $J_p(x)$ токов.

Для расчета статических электрических параметров диода, таких как вольт-амперная и вольт-фарадная характеристики, необходимо решать систему (15) с граничными условиями:

$$\begin{aligned} n(L/2) &= n(E_F^{(v)}(-L/2) - e\varphi_b), \\ p(-L/2) &= p(E_F^{(v)}(-L/2)), \\ \varphi(-L/2) &= 0, \quad \varphi(L/2) = \varphi_b - U, \\ J_n(-L/2) &= J_p(L/2) = 0, \end{aligned} \quad (16)$$

при разных значениях внешнего напряжения U .

Стационарная плотность полного тока J есть сумма плотностей электронного $J_n(x)$ и дырочного $J_p(x)$ токов; J не зависит от x .

В медленно изменяющемся во времени внешнем электрическом поле, по сравнению с темпом обмена t -дефектов электронами и дырками с зонами разрешенных значений энергии, отношение дифференциальной емкости диода C_d к площади S плоского p - n -перехода определяется так [13, 21, 22]:

$$\frac{C_d}{S} = \frac{1}{S} \left| \frac{dQ}{dU} \right|, \quad (17)$$

где нескомпенсированный электрический заряд $Q(U)$ вычисляется интегрированием абсолютной величины плотности объемного заряда $\rho(x, U)$ по координате x так:

$$Q(U) = \frac{S}{2} \int_{-L/2}^{L/2} |\rho(x, U)| dx; \quad S \int_{-L/2}^{L/2} \rho(x, U) dx = 0.$$

Результаты расчетов и обсуждение

Численное решение системы стационарных нелинейных уравнений (15) с граничными условиями (16) выполнялось без какой-либо дополнительной подгонки в программном пакете *MatLab* 2015. Объект исследования – кремниевый диод длиной $L = 10$ мкм с параметром профиля легирования $l = 0,2$ мкм акцепторами $|ap$ и донорами $|dn$, шириной δ -слоя t -дефектов $\Delta = 3l = 0,6$ мкм и концентрацией t -дефектов $N_t(0) = 10^{16}$ см $^{-3}$ в центре p - n -перехода (при $x = 0$). В качестве легирующих водородоподобных атомов примесей были выбраны бор (акцепторы) и фосфор (доноры) с концентрациями на границах диода: $N_a(-L/2) = N_d(L/2) = 7 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$ (т. е. симметричный p - t - n -диод). Вероятные средние значения уровней энергии t -дефектов в запрещенной зоне (энергетической щели) кремния оценены по работе [23] так: $E_1^{(v)} = 210$ мэВ, $E_2^{(v)} = 780$ мэВ.

Следуя [24, 25] принималось, что время жизни электронов и дырок в кристаллическом кремнии (ограниченное их межзонной рекомбинацией при концентрациях атомов бора N_a и фосфора N_d меньше 10^{16} см $^{-3}$) $\tau_i = 100$ мкс. При расчетах использовались вероятные значения сечений захвата, соответствующие дефектам типа дивакансии [26–30]: $S_n = 10^{-15}$ см 2 [при захвате электронов s -зоны на t -дефекты в зарядовых состояниях (0) и $(+1)$] и $S_p = 10^{-14}$ см 2 [при захвате дырок v -зоны на t -дефекты в зарядовых состояниях (-1) и (0)].

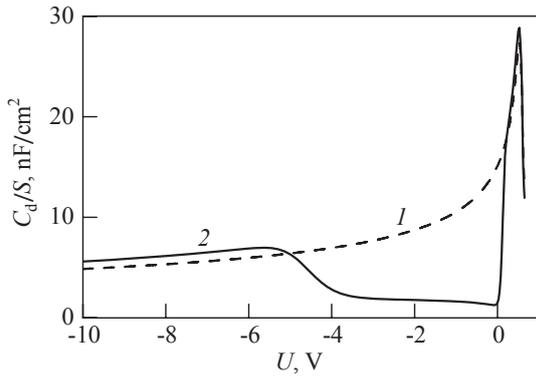


Рисунок 3 – Зависимость статической (низкочастотной) емкости C_d (отнесенной к площади $p-n$ -перехода S) от напряжения U на диоде: кривая 1 – $p-n$ -диод без t -дефектов; 2 – $p-t-n$ -диод, содержащий в области $p-n$ -перехода δ -слой t -дефектов $N_t(0) = 10^{16} \text{ см}^{-3}$

Figure 3 – Dependence of static (low-frequency) capacitance C_d (related to the area of $p-n$ -junction S) on the voltage U through diode: curve 1 is $p-n$ -diode without t -defects; 2 is $p-t-n$ -diode containing in $p-n$ -junction region a δ -layer of t -defects $N_t(0) = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

Далее все расчеты электрических параметров $p-t-n$ -диода, а также $p-n$ -диода выполнены для температуры $T = 300 \text{ K}$.

На рисунке 3 представлены вольт-фарадные характеристики кремниевого диода без t -дефектов (кривая 1) и содержащего δ -слой t -дефектов [$N_t(0) = 10^{16} \text{ см}^{-3}$] в области $p-n$ -перехода (кривая 2).

На рисунке 4 для $p-t-n$ -диода представлено распределение объемной плотности заряда $\rho(x, U)$ вдоль диода для напряжений смещения: $U = 0; -2,5; +0,3 \text{ В}$. Зависимость $\rho(x)$ несимметрична относительно $x = 0$ в основном из-за того, что уровни энергии $E_1^{(v)}$ и $E_2^{(v)}$ несимметричны относительно середины запрещенной энергетической зоны кремния. Так как согласно (13) дивергенция суммарного стационарного тока электронов и дырок $dJ/dx = d(J_n + J_p)/dx$ равна нулю, то суммарный заряд между p^+ - и n^+ -контактами к диоду равен нулю:

$$S \int_{-L/2}^{L/2} \rho(x, U) dx = 0.$$

Низкочастотная дифференциальная емкость C_d кремниевого $p-n$ -диода (без t -дефектов) получена в результате решения стационарной системы дифференциальных уравнений (15), которая в дрейфово-диффузионном приближении описывает процессы миграции, а также межзонной рекомбинации электронов и дырок. При расчете в

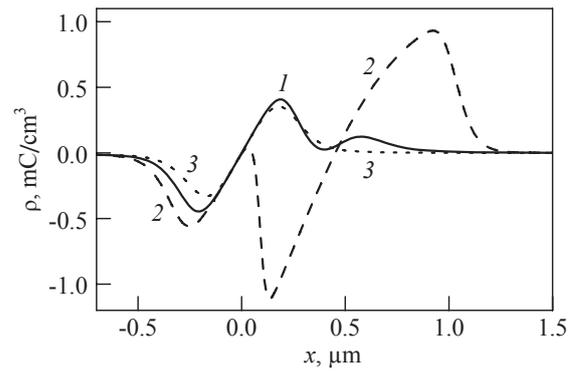


Рисунок 4 – Зависимость объемной плотности электрического заряда ρ от координаты x для $p-t-n$ -диода [$N_t(0) = 10^{16} \text{ см}^{-3}$; $\Delta = 3l = 0.6 \text{ мкм}$] при напряжении $U = 0 \text{ В}$ (кривая 1), $U = -2,5 \text{ В}$ (2) и $U = 0,3 \text{ В}$ (3)

Figure 4 – Dependence of volume density of electric charge ρ on coordinate x for $p-t-n$ -diode [$N_t(0) = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; $\Delta = 3l = 0.6 \text{ }\mu\text{m}$] at voltage $U = 0 \text{ V}$ (curve 1), $U = -2,5 \text{ V}$ (2) and $U = 0,3 \text{ V}$ (3)

качестве легирующих примесей [ap] и [dn]) были выбраны бор и фосфор, распределенные согласно формуле (1). Расчет показывает, что в пределе $l \rightarrow 0$ зависимость барьерной емкости C_d от обратного напряжения смещения ($U < 0$) согласуется с классической формулой для $p-n$ -диода с резким плоским $p-n$ -переходом [21, 22]:

$$\frac{C_d}{S} = \sqrt{\frac{e \epsilon_r \epsilon_0 N_a N_d}{2(\phi_b - U)(N_a + N_d)}}, \quad (18)$$

где S – площадь $p-n$ -перехода; $\phi_b > 0$ – контактная разность электрических потенциалов.

По сравнению с диодом без t -дефектов, вольт-фарадная характеристика $C_d(U)$ диода с t -дефектами отличается немонотонной зависимостью дифференциальной емкости C_d от напряжения смещения (при обратном смещении возникает аномальная область с участком увеличения емкости). Это можно объяснить перераспределением зарядовых состояний t -дефектов по координате x в двойном электрическом слое при обратном смещении диода (см. рисунок 4) [31, 32]. Емкость $p-t-n$ -диода увеличивается до тех пор, пока не произойдет полная перезарядка t -дефектов. После этого емкость начинает уменьшаться при увеличении обратного смещения ($U < 0$), как и в диоде без t -дефектов (см. формулу (18)). Вольт-фарадная характеристика такого типа наблюдалась [3] в кремниевом диоде, в котором путем ионной имплантации ксенона был сформирован слой компенсирующих дефектов с максимальной концентрацией вблизи $p-n$ -перехода.

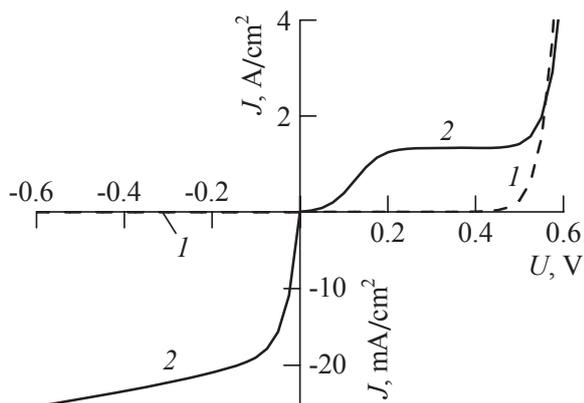


Рисунок 5 – Зависимость стационарной плотности электрического тока $J = J_n + J_p$ от напряжения U на p - n -диоде [кривая 1 при $N_t(0) = 0$] и на p - t - n -диоде [кривая 2 при $N_t(0) = 10^{16} \text{ см}^{-3}$]

Figure 5 – Dependence of stationary electric current density $J = J_n + J_p$ on the voltage U through p - n -diode [curve 1 for $N_t(0) = 0$] and through p - t - n -diode [curve 2 for $N_t(0) = 10^{16} \text{ см}^{-3}$]

На рисунке 5 представлены рассчитанные вольт-амперные характеристики (ВАХ) кремниевого диода без t -дефектов (кривая 1) и диода со слоем t -дефектов в области p - n -перехода (кривая 2). Отметим, что рассчитанная ВАХ диода без t -дефектов (кривая 1) хорошо согласуется с ВАХ реальных симметричных кремниевых диодов [25].

Для диода со слоем t -дефектов в области p - n -перехода (кривая 2) модель, построенная выше, предсказывает существенное отличие ВАХ. Так, из графика видно, что при обратном смещении, ток через диод, содержащий δ -слой t -дефектов, значительно больше обратного тока через диод без t -дефектов. (Максимальная напряженность электрического поля E внутри кремниевого p - t - n -диода была на порядок меньше порогового значения ($\approx 100 \text{ кВ/см}$) для электрического пробоя p - n -диода при комнатной температуре [33, 34].)

Прямая ветвь ВАХ диода со слоем t -дефектов в области p - n -перехода (кривая 2) также отличается от ВАХ диода без t -дефектов (кривая 1) и напоминает ВАХ обращенного p^+ - n^+ -диода [35]. Точнее, построенная модель предсказывает, что при увеличении прямого напряжения смещения от 0 до 0,2 В ток через диод, содержащий δ -слой t -дефектов в области p - n -перехода, суперлинейно увеличивается, после чего в диапазоне напряжений от 0,2 до 0,45 В происходит его стабилизация. Это можно объяснить рекомбинацией электронов и дырок на t -дефектах в двойном электрическом

слое толщиной $x_a + x_d$. Из-за асимметрии сечений захвата дырок и электронов ($S_p > S_n$) инжектируемые из p -области в область двойного электрического слоя дырки захватываются отрицательно заряженными t -дефектами и нейтрализуют их. При дальнейшем увеличении напряжения электроны s -зоны и дырки v -зоны не успевают прокомбинировать на t -дефектах, что приводит к резкому (экспоненциальному) увеличению тока двойной инжекции, и кривая 2 для p - t - n -диода практически совпадает с кривой 1 для p - n -диода (без t -дефектов).

Заключение

Впервые построена модель симметричного кремниевого p - t - n -диода, содержащего в области p - n -перехода δ -слой точечных двухуровневых t -дефектов, которые могут находиться в трех зарядовых состояниях ($-1, 0, +1$). В рамках дрейфово-диффузионного приближения рассчитаны статическая емкость и плотность электрического тока для p - t - n -диода с невырожденными областями p - и n -типа электропроводности при прямом и обратном напряжениях смещения.

Расчеты показывают, что в p - t - n -диоде при прямом смещении ($U > 0$) в диапазоне напряжений от 0,2 до 0,45 В для комнатной температуры плотность тока значительно больше, чем в диоде без t -дефектов, и слабо зависит от напряжения U (область стабилизации тока). Плотность обратного тока в p - t - n -диоде на несколько порядков больше, чем в обычном p - n -диоде (без t -дефектов). Таким образом, при прямом смещении p - t - n -диод имитирует обращенный p^+ - n^+ -диод. При обратном смещении ($U < 0$) низкочастотная барьерная емкость диода с t -дефектами немонотонно зависит от U . При малых смещениях емкость p - t - n -диода существенно меньше емкости диода без t -дефектов.

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Маттех». Авторы признательны А.Т. Власову и С.А. Вырко за конструктивные замечания по алгоритму расчета электрических параметров диодов.

The work was supported by the Belarusian National Research Program «Mattekh». The authors are grateful to A.T. Vlassov and S.A. Vyrko for helpful comments on the algorithm of calculation of electrical parameters of diodes.

Список использованных источников

1. Шик, А.Я. Полупроводниковые структуры с δ -слоями / А.Я. Шик // ФТП. – 1992. – Т. 26, № 7. – С. 1161–1181.

2. El-Hajj, H. Characteristics of boron δ -doped diamond for electronic applications / H. El-Hajj [et al.] // Diamond Relat. Mater. – 2008. – V. 17, № 4–5. – pp. 409–414. doi: 10.1016/j.diamond.2007.12.030

3. Poklonski, N.A. Impedance and barrier capacitance of silicon diodes implanted with high-energy Xe ions / N.A. Poklonski [et al.] // Microelectron. Reliab. – 2010. – Vol. 50, № 6. – pp. 813–820. doi: 10.1016/j.microrel.2010.02.007

4. Li, J. 35% efficient nonconcentrating novel silicon solar cell / J. Li [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 1992. – Vol. 60, № 18. – P. 2240–2242. doi: 10.1063/1.107042

5. Summonte, C. Spectral behavior of solar cells based on the “junction near local defect layer” design / C. Summonte [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 1993. – Vol. 63, № 6. – P. 785–787. doi: 10.1063/1.109907

6. Комаров, Ф.Ф. Моделирование технологических процессов субмикронной электроники для систем проектирования интегральных схем / Ф.Ф. Комаров [и др.] // Вестн. БГУ. Сер. 1. – 2011. – № 3. – С. 26–32.

7. Замалин, Е.Ю. Некоторые задачи моделирования технологических процессов изготовления приборов микроэлектроники / Е.Ю. Замалин, О.Б. Бондарь // Микроэлектроника. – 1995. – Т. 24, № 4. – С. 309–314.

8. Поклонский, Н.А. Полупроводниковый диод с прыжковой миграцией электронов по точечным дефектам кристаллической матрицы / Н.А. Поклонский, А.И. Ковалев, С.А. Вырко, А.Т. Власов // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 3. – С. 30–37.

9. Siemieniec, R. Compensation and doping effects in heavily helium-radiated silicon for power device applications / R. Siemieniec [et al.] // Microelectron. J. – 2006. – Vol. 37, № 3. – P. 204–212. doi: 10.1016/j.mejo.2005.09.011

10. Челядинский, А.Р. Эффект Воткинса в полупроводниках. Явление и приложения в микроэлектронике / А.Р. Челядинский, В.Б. Оджаев // Вестн. БГУ. Сер. 1. – 2011. – № 3. – С. 10–17.

11. Поклонский, Н.А. Ионизационное равновесие и прыжковая электропроводность в легированных полупроводниках. – Минск : БГУ, 2004. – 195 с.

12. Поклонский, Н.А. Статистическая физика полупроводников / Н.А. Поклонский, С.А. Вырко, С.Л. Поденок. – М. : КомКнига, 2005. – 264 с.

13. Бонч-Бруевич, В.Л. Физика полупроводников / В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. – М.: Наука, 1990. – 688 с.

14. Poklonski, N.A. Drift-diffusion model of hole migration in diamond crystals via states of valence and acceptor bands / N.A. Poklonski, S.A. Vyrko, A.I. Kova-

lev, A.N. Dzeraviahia // J. Phys. Commun. – 2018. – Vol. 2, № 1. – P. 015013 (14 p.). doi: 10.1088/2399-6528/aa8e26

15. Мнацаканов, Т.Т. Универсальный метод аналитической аппроксимации подвижности основных носителей заряда в полупроводниках в широком диапазоне температур и уровней легирования / Т.Т. Мнацаканов, М.Е. Левинштейн, Л.И. Поморцева, С.Н. Юрков // ФТП. – 2004. – Т. 38, № 1. – С. 56–60. doi: 10.1134/1.1641133

16. Воловичев, И.Н. Генерационно-рекомбинационные процессы в полупроводниках / И.Н. Воловичев, Ю.Г. Гуревич // ФТП. – 2001. – Т. 35, № 3. – С. 321–329. doi: 10.1134/1.1356153

17. Поклонский, Н.А. Дрейф и диффузия электронов по двухуровневым (трехзарядным) точечным дефектам в кристаллических полупроводниках / Н.А. Поклонский, А.И. Ковалев, С.А. Вырко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2014. – Т. 58, № 3. – С. 37–43.

18. Bleichner, H. Temperature and injection dependence of the Shockley–Read–Hall lifetime in electron irradiated *n*-type silicon / H. Bleichner, P. Jonsson, N. Keskitalo, E. Nordlander // J. Appl. Phys. – 1996. – Vol. 79, № 12. – P. 9142–9148. doi: 10.1063/1.362585

19. Львов, В.С. Межцентровые переходы носителей заряда в частично разупорядоченном кремнии: эксперимент и обсуждение результатов / В.С. Львов, В.И. Стриха, О.В. Третьяк, А.А. Шматов // ФТТ. – 1989. – Т. 31, № 11. – С. 206–213.

20. Березин, Ю.А. Метод расщепления для задач физики полупроводников / Ю.А. Березин, Н.Н. Яненко // Докл. Акад. наук СССР. – 1984. – Т. 274, № 6. – С. 1338–1340.

21. Ржевкин, К.С. Физические принципы действия полупроводниковых приборов / К.С. Ржевкин. – М. : МГУ, 1986. – 256 с.

22. Росадо, Л. Физическая электроника и микроэлектроника / Л. Росадо. – М. : Высш. шк., 1991. – 351 с.

23. Коршунов, Ф.П. Об акцепторных уровнях дивакансии в кремнии / Ф.П. Коршунов, В.П. Маркевич, И.Ф. Медведева, Л.И. Мушин // ФТП. – 1992. – Т. 26, № 11. – С. 2006–2010.

24. Schroder, D.K. Carrier lifetimes in silicon / D.K. Schroder // IEEE Trans. Electron Dev. – 1997. – Vol. 44, № 1. – P. 160–170. doi: 10.1109/16.554806

25. Маллер, Р. Элементы интегральных схем / Р. Маллер, Т. Кейминс. – М. : Мир, 1989. – 630 с.

26. Комаров, Б.А. Особенности отжига радиационных дефектов в кремниевых *p-n*-структурах: роль примесных атомов железа / Б.А. Комаров // ФТП. – 2004. – Т. 38, № 9. – С. 1079–1083. doi: 10.1134/1.1797482

27. Абакумов, В.Н. Безызлучательная рекомбинация в полупроводниках / В.Н. Абакумов, В.И. Перель, И.Н. Ясиевич. – СПб. : ПИЯФ РАН, 1997. – 376 с. doi: 10.1016/B978-0-444-88854-9.50002-3

28. Бургуэн, Ж. Точечные дефекты в полупроводниках. Экспериментальные аспекты / Ж. Бургуэн, М. Ланно. – М. : Мир, 1985. – 304 с.

doi: 10.1007/978-3-642-81832-5

29. Емцев, В.В. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках / В.В. Емцев, Т.В. Машовец. – М. : Радио и связь, 1981. – 248 с.

30. Милнс, А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках / А. Милнс. – М. : Мир, 1977. – 564 с.

31. Шеховцов, Н.А. Дифференциальная емкость p^+p -перехода / Н.А. Шеховцов // ФТП. – 2012. – Т. 46, № 1. – С. 60–69. **doi:** 10.1134/S1063782612010174

32. Мурыгин, В.И. Аномальные зависимости барьерной емкости диода от напряжения смещения и температуры / В.И. Мурыгин, А.У. Фаттахдинов, Д.А. Локтев, В.Б. Гундырев // ФТП. – 2007. – Т. 41, № 10. – С. 1207–1213. **doi:** 10.1134/S1063782607010174

33. Кюрегян, А.С. Напряжение лавинного пробоя p - n -переходов на основе Si, Ge, SiC, GaAs, GaP и InP при комнатной температуре / А.С. Кюрегян, С.Н. Юрков // ФТП. – 1989. – Т. 23, № 10. – С. 1819–1827.

34. Maes, W. Impact ionization in silicon: a review and update / W. Maes, K. De Meyer, R. Van Overstraeten // Solid-State Electron. – 1990. – Vol. 33, № 6. – P. 705–718. **doi:** 10.1016/0038-1101(90)90183-F

35. Ng, K.K. Complete guide to semiconductor devices / K.K. Ng. – New York : Wiley, 2002. – xxiv+740 p. **doi:** 10.1002/9781118014769

References

1. Shik A.Ya. Semiconductor structures with delta-layers. *Sov. Phys. Semicond.*, 1992, vol. 26, no. 7, pp. 649–660.

2. El-Hajj H., Denisenko A., Bergmaier A., Dollinger G., Kubovic M., Kohn E. Characteristics of boron δ -doped diamond for electronic applications. *Diamond Relat. Mater.*, 2008, vol. 17, no. 4–5, pp. 409–414. **doi:** 10.1016/j.diamond.2007.12.030

3. Poklonski N.A., Gorbachuk N.I., Shpakovski S.V., Filipenia V.A., Lastovskii S.B., Skuratov V.A., Wieck A., Markevich V.P. Impedance and barrier capacitance of silicon diodes implanted with high-energy Xe ions. *Microelectron. Reliab.*, 2010, vol. 50, no. 6, pp. 813–820. **doi:** 10.1016/j.microrel.2010.02.007

4. Li J., Chong M., Zhu J., Li Y., Xu J., Wang P., Shang Z., Yang Z., Zhu R., Cao X. 35% efficient non-concentrating novel silicon solar cell. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, vol. 60, no. 18, pp. 2240–2242. **doi:** 10.1063/1.107042

5. Summonte C., Biavati M., Gabilli E., Galloni R., Guerri S., Rizzoli R., Zignani F. Spectral behavior of solar cells based on the “junction near local defect layer” design. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, vol. 63, no. 6, pp. 785–787. **doi:** 10.1063/1.109907

6. Komarov F.F., Komarov A.F., Mironov A.M., Zayats G.M., Makarevich Yu.V., Miskevich S.A. [Simulation of the submicron electronics processing technologies for the computer-aided design of integrated circuits]. *Vestnik BGU. Ser. 1* [BSU Bull. Ser. 1], 2011, no. 3, pp. 26–32 (in Russian).

7. Zamalin E.Yu., Bondar’ O.B. [Some problems of modeling of technological processes for the manufacturing of microelectronics devices]. *Mikroelektronika* [Russ. Microelectron.], 1995, vol. 24, no. 4, pp. 309–314 (in Russian).

8. Poklonski N.A., Kovalev A.I., Vyrko S.A., Vlassov A.T. Semiconductor diode with hopping migration of electrons via point defects of crystalline matrix. *Doklady Natsional’noi akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2017, vol. 61, no. 3, pp. 30–37 (in Russian).

9. Siemieniec R., Schulze H.-J., Niedernostheide F.-J., Stüdkamp W., Lutz J. Compensation and doping effects in heavily helium-radiated silicon for power device applications. *Microelectron. J.*, 2006, vol. 37, no. 3, pp. 204–212. **doi:** 10.1016/j.mejo.2005.09.011

10. Chelyadinskii A.R., Odzaev V.B. [Watkins effect in semiconductors. Phenomenon and applications in microelectronics]. *Vestnik BGU. Ser. 1* [BSU Bull. Ser. 1], 2011, no. 3, pp. 10–17 (in Russian).

11. Poklonski N.A. [Ionization equilibrium and hopping conductivity in doped semiconductors]. Minsk, BGU Publ., 2004, 195 p. (in Russian).

12. Poklonski N.A., Vyrko S.A., Podenok S.L. Statistical physics of semiconductors. Moscow, KomKniga Publ., 2005, 264 p. (in Russian).

13. Bonch-Bruevich V.L., Kalashnikov S.G. Semiconductor physics. Moscow, Nauka Publ., 1990, 688 p. (in Russian).

14. Poklonski N.A., Vyrko S.A., Kovalev A.I., Dze-raviahia A.N. Drift-diffusion model of hole migration in diamond crystals via states of valence and acceptor bands. *J. Phys. Commun.*, 2018, vol. 2, no. 1, pp. 015013 (14 p.). **doi:** 10.1088/2399-6528/aa8e26

15. Mnatsakanov T.T., Levinshtein M.E., Pomortseva L.I., Yurkov S.N. Universal analytical approximation of the carrier mobility in semiconductors for a wide range of temperatures and doping densities. *Semiconductors*, 2004, vol. 38, no. 1, pp. 56–60. **doi:** 10.1134/1.1641133

16. Volovichev I.N., Gurevich Yu.G. Generation-recombination processes in semiconductors. *Semiconductors*, 2001, vol. 35, no. 3, pp. 306–315. **doi:** 10.1134/1.1356153

17. Poklonski N.A., Kovalev A.I., Vyrko S.A. [Drift and diffusion of electrons via two-level (triplecharged) point defects in crystalline semiconductors]. *Doklady Natsional’noi akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2014, vol. 58, no. 3, pp. 37–43.

18. Bleichner H., Jonsson P., Keskitalo N., Nordlander E. Temperature and injection dependence of the Shockley–Read–Hall lifetime in electron irradiated *n*-type silicon. *J. Appl. Phys.*, 1996, vol. 79, no. 12, pp. 9142–9148. **doi:** 10.1063/1.362585
19. L'vov V.S., Strikha V.I., Tretyak O.V., Shmatov A.A. Intercenter carrier transitions in partly disordered silicon: experiments and discussion of results. *Sov. Phys. Solid State*, 1989, vol. 31, no. 11, pp. 1953–1958.
20. Berezin Yu.A., Yanenko N.N. Method of splitting for solution of problems in semiconductor physics. USSR Rept. Phys. Math., 1984, JPRS-UPM-84-006, pp. 117.
21. Rzhavkin K.S. [Physical principles of semiconductor device operation]. Moscow, MGU Publ., 1986, 256 p. (in Russian).
22. Rosado L. *Electrónica física y microelectrónica*. Madrid, Paraninfo, 1987, 502 p.
23. Korshunov F.P., Markevich V.P., Medvedeva I.F., Murin L.I. Acceptor levels of a divacancy in silicon. *Sov. Phys. Semicond.*, 1992, vol. 26, no. 11, pp. 1129–1131.
24. Schroder D.K. Carrier lifetimes in silicon. *IEEE Trans. Electron Dev.*, 1997, vol. 44, no. 1, pp. 160–170. **doi:** 10.1109/16.554806
25. Muller R.S., Kamins T.I., Chan M. *Device Electronics for Integrated Circuits*. New York, Wiley, 2002, xx+528 p.
26. Komarov B.A. Special features of radiation-defect annealing in silicon *p–n* structures: The role of Fe impurity atoms. *Semiconductors*, 2004, vol. 38, no. 9, pp. 1041–1046. **doi:** 10.1134/1.1797482
27. Abakumov V.N., Perel' V.I., Yassievich I.N. *Nonradiative Recombination in Semiconductors*. Amsterdam, North-Holland, 1991, xvi+320 p. **doi:** 10.1016/B978-0-444-88854-9.50002-3
28. Bourgoin J., Lannoo M. *Point Defects in Semiconductors II. Experimental Aspects*. Berlin, Springer, 1983, xvi+296 p. **doi:** 10.1007/978-3-642-81832-5
29. Emtsev V.V., Mashovets T.V. [Impurities and point defects in semiconductors]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1981, 248 p. (in Russian).
30. Milnes A.G. *Deep Impurities in Semiconductors*. New York, Wiley, 1973, xviii+526 p.
31. Shekhovtsov N.A. Differential capacitance of a $p^+–p$ junction. *Semiconductors*, 2012, vol. 46, no. 1, pp. 56–66. **doi:** 10.1134/S1063782612010174
32. Murygin V.I., Fattakhidinov A.U., Loktev D.A., Gundyrev V.B. Anomalous dependences of the diode barrier capacitance on bias voltage and temperature. *Semiconductors*, 2007, vol. 41, no. 10, pp. 1189–1196. **doi:** 10.1134/S106378260
33. Kyuregyan A.S., Yurkov S.N. Room-temperature avalanche breakdown voltages of *p–n* junctions made of Si, Ge, SiC, GaAs, GaP, and InP. *Sov. Phys. Semicond.*, 1989, vol. 23, no. 10, pp. 1126–1131.
34. Maes W., De Meyer K., Van Overstraeten R. Impact ionization in silicon: a review and update. *Solid-State Electron.*, 1990, vol. 33, no. 6, pp. 705–718. **doi:** 10.1016/0038-1101(90)90183-F
35. Ng K.K. *Complete Guide to Semiconductor Devices*. New York, Wiley, 2002, xxiv+740 p. **doi:** 10.1002/9781118014769

УДК 620.179.161.534.1

Трансформация и рассеяние поверхностных волн на акустической нагрузке для ультразвукового контроля и измерений. Ч. 2. Объект исследования – тело с выступом

Баев А.Р.¹, Майоров А.Л.¹, Асадчая М.В.¹, Коновалов Г.Е.¹, Сергеева О.С.²

¹Ин-т прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь

²Белорусско-Российский университет,
пр. Мира, 43, г. Могилев 212000, Беларусь

Поступила 23.04.2018

Принята к печати 29.05.2018

Недостаток информации об особенностях процессов трансформации и рассеяния поверхностных волн в металлоизделиях с выступами, проточками, радиусными переходами и др. сказывается как на достоверности акустического контроля, так и на расширении его технических возможностей. Цель данной работы заключалась в уточнении механизма трансформации упругих мод и закономерностей формирования полей рассеянных краевых объемных волн в объектах с выступами разной геометрии, а также в установлении возможностей использования результатов исследований в области ультразвукового контроля и измерений.

Теоретически и экспериментально показано, что результирующее поле объемных мод в объекте с углом выступа $0-135^\circ$ и безразмерным радиусом радиусного перехода $0-10,2$ является суперпозицией поля сопутствующих и трансформированных на выступе из поверхностной волны краевой продольной и поперечной моды, существенно различающихся по направленности и амплитуде. Преобладающий по величине на ~ 10 дБ и более глобальный максимум поля поперечной моды, лежит в окрестности продолжения плоскости контактной поверхности, а обнаруженные при радиусном переходе выступа менее 1 локальные угловые осцилляции поля до $\sim 10-20$ дБ обусловлены влиянием отходящей поперечной моды, возникающей при прохождении вдоль поверхности передней грани выступа головной моды.

Данные исследований предложено использовать для ультразвукового контроля объектов сложного профиля на наличие слабо отражающих звук дефектов, изучение акустических свойств материалов по данным скорости краевых мод на разных частотах при удаленном расположении их от изучаемого объекта, а также – для излучения-приема поперечной моды разной поляризации.

Ключевые слова: поверхностные волны, поперечные волны, продольные волны, трансформация мод; поле акустического рассеяния.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-142-154

Адрес для переписки:

Баев А.Р.
Ин-т прикладной физики Национальной академии наук 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:

Баев А.Р., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Сергеева О.С., Коновалов Г.Е.
Трансформация и рассеяние поверхностных волн на акустической
нагрузке для ультразвукового контроля и измерений. Ч. 2. Объект
исследования – тело с выступом
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 2. – С. 142–154.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-142-154

For citation:

Baev A.R., Mayorov A.L., Asadchaya M.V., Kononov G.E. Sergeeva O.S.
[Transformation and scattering of surface waves on the acoustic load to
ultrasonic evaluation and measurements. Part 2. The object to study –
solid with ledge.
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 2, pp. 142–154 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-142-154

Transformation and scattering of surface waves on the acoustic load to ultrasonic evaluation and measurements. Part 2. The object to study – solid with ledge

Baev A.R.¹, Mayorov A.L.¹, Asadchaya M.V.¹, Konovalov G.E.¹, Sergeeva O.S.²

¹*Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus*

²*Belarusian-Russian University,
Mira Ave., 43, Mogilev 212000, Belarus*

Received 23.04.2018

Accepted for publication 29.05.2018

Abstract

The lack of information about the features of processes of the surface wave's transformation into volume waves and its scattering in metal objects with ledge, slots, grooves and the others is one of the obstacles to improve of the acoustical testing reliability and widening of technical application. The aim of this work was to study of mechanism of acoustical mode's transformation and determination the laws of the fields forming of scatted volume edge wave's in solids with ledge of different geometry and to suggest direction of the study application in area of acoustical testing and measurements.

The features of transformation of surface waves into edge transverse and longitudinal wave modes scatted and their fields forming in the volume of the object with ledge vs. its angle of the slope front surface side (0–135°) and a dimensionless transition radius (0–10,2) varied were studied. Theoretical analysis and experimental data shown that in general case the field of the edge transverse waves in the volume of ledge can be imagined as a superposition of the field of edge waves (scatted on ledge) and accompany waves too, radiated simultaneously with the surface waves to radiate. If dimensionless size of the ledge's transition radius lesser than 1 the resulting field of the edge transverse waves is the summary field of two sources. One of them (with small aperture) is localized in the vicinity of the place of intersection of contact surface with ledge's front side surface. As it was found, the second source of the edge transverse waves – the edge head longitudinal waves to appear in the results of transformation of surface waves on the ledge's radius transition. The structure of the edge acoustic fields including their extremes vs. ledge's angle and its radius transition, position of the surface wave's probe were experimentally studied and theoretically analyzed.

Some directions of the results of researches using are the next: a) ultrasonic testing of hard-to-make technological objects in which defects have low sound reflection; b) ultrasonic structure diagnostics of solid (specimens) set far from the ultrasonic by using edge volume transverse and longitudinal modes; c) creation of new ultrasonic arrangements to sound and to receive transverse waves of different polarization.

Keywords: surface waves, transverse waves, longitudinal waves, mode's transformation, field of acoustic scattering.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-142-154

Адрес для переписки:

Баев А.Р.
Ин-т прикладной физики Национальной академии наук 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:

Баев А.Р., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Сергеева О.С., Коновалов Г.Е.
Трансформация и рассеяние поверхностных волн на акустической
нагрузке для ультразвукового контроля и измерений. Ч. 2. Объект
исследования – тело с выступом
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 2. – С. 142–154.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-142-154

For citation:

Baev A.R., Mayorov A.L., Asadchaya M.V., Konovalov G.E. Sergeeva O.S.
[Transformation and scattering of surface waves on the acoustic load to
ultrasonic evaluation and measurements. Part 2. The object to study –
solid with ledge.
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 2, pp. 142–154 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-142-154

Введение

подавляющее большинство работ, связанных с применением возбуждаемых волн Рэлея, направлены, как правило, на выявление дефектов, расположенных на свободной поверхности твердого тела или на границе сред [1–3], определение физико-механических свойств материалов по данным скорости поверхностной акустической волны (ПАВ), ее амплитудно-частотным, амплитудно-угловым зависимостям [4–6]. Превалирующая часть энергии этих волн локализована в поверхностном слое (слоях) исследуемого материала глубиной, не превышающей их длины волны ($h \approx \lambda_{\text{ПАВ}}$). Благодаря ряду особенностей распространения, эти волны, а также эффекты их трансформации используются в системах обработки информации [6].

Дальнейшее расширение возможностей применения ПАВ связано с решением ряда задач по их распространению при наличии неоднородных граничных условий на контактной поверхности. Такие условия создаются, например, при прохождении ПАВ по поверхности, имеющей сложный рельеф, включая выступы, радиусные переходы, проточки и др., а также при наличии в области распространения акустической нагрузки, создаваемой контактом с другим телом. При этом процессы трансформации и рассеяния поверхностных волн на таких объектах представляют значительный интерес для совершенствования неразрушающих методов контроля значительного числа объектов, а также для решения обратной задачи, заключающейся в использовании указанных эффектов для создания средств ультразвуковых измерений.

Наличие разных граничных условий в области контакта тел обуславливает превалирующий механизм трансформации и рассеяния упругих мод. В работе [8] получены обобщенные условия существования слабозатухающих ПАВ или волн Стоунли, трансформированных из волны Рэлея и обратно на акустической нагрузке при наличии не только скользящего, жесткого, но и комбинированного контакта. В экспериментальной работе [4] исследованы преимущественно особенности трансформации волны Рэлея в волну Стоунли и обратно на акустической нагрузке, создаваемой путем контакта с твердым телом через скользящую границу, определены функции прохождения и отражения потока энергии ПАВ от передней и задней границ контактирующих

тел в зависимости от угла наклона одной из граний нагружающего тела призматической формы диапазоне $-\pi/4 \leq \gamma \leq \pi/4$. Если же граничные условия вырождаются в «жесткие», то, как показано на одном из примеров, параметры трансформации и рассеяния мод имеют существенные отличия. В этом случае превалирующая часть энергии ПАВ на выступе трансформируется в объемную поперечную моду. В этом случае отражательная способность области контакта одинаковых по свойствам тел при реализации их жесткой границы $R = P_2/P_1$ более чем на порядок меньше, чем при наличии скользящей границы, где P_1 и P_2 – амплитуды отраженных волн от передней и задней границ контакта тела акустической нагрузки с основой. В то же время коэффициенты прохождения акустического сигнала через выступ (с учетом двойной трансформации мод) сравнимы по величине.

В работе [9] при исследовании прохождения подповерхностной поперечной волны в зависимости от длины выступа высказано предположение о существенном вкладе в результирующее поле рассеянной краевой поперечной волны при трансформации ПАВ в зоне сопряжения передней грани выступа с контактной поверхностью.

Необходимо отметить, что при постановке задачи о прохождении ПАВ через линейную границу контакта тел Γ , разделяющую области с различными граничными условиями относительно составляющих тензора напряжений $\{(\sigma_{ik})_I, (\sigma_{ik})_{II}\}$ и тензора смещений $\{(\xi_i)_I, (\xi_i)_{II}\}$, последние изменяются скачкообразно. При этом в окрестности границ $\Gamma(x_{0i})$ контакта поверхности тела нагрузки с контактной поверхностью при $\Delta x_i = x_i - x_{0i} \rightarrow 0$ $\Delta(\xi_i)_{I,II}/\Delta x_{0i} \rightarrow \infty$. Передаточная же функция, характеризующая трансформацию мод или изменение основной моды в процессе прохождения этой границы, проявляет сингулярность при $\Delta x_i \rightarrow 0$. Важно отметить, что теоретическое моделирование подобных процессов (трансформации) при сочетании других типов мод выполнено, например, на исследуемом объекте с трещиной [2, 7]. Что касается теоретического моделирования процессов трансформации и рассеяния ПАВ на объектах с выступами разной геометрии, то они недостаточно изучены. В этом случае для корректного выбора той или иной модели требуется проведение экспериментальных исследований и тщательный анализ их результатов. Очевидно, что указанные процессы представляют не только научный, но и практический интерес.

Цель данной работы заключалась в уточнении механизма трансформации волны Рэлея и закономерностей формирования полей рассеянных объемных мод на объектах с выступами разной геометрии и выявлении возможностей использования результатов исследований в области ультразвукового контроля и измерений.

Краткий теоретический анализ проблемы для случая двумерной постановки задачи

При падении акустического пучка на плоскую контактную поверхность объекта под характерным углом $\beta = \arcsin(c_1/c_s)$, в объекте возбуждается не только основная поверхностная мода (волна Рэлея), но и сопутствующие объемные моды – продольная (L) и поперечная (T) мода, обозначаемые дополнительным индексом A , c_1 – скорость звука в среде, из которой падает волна, а c_s – скорость ПАВ. Так что энергия падающего потока акустического пучка равна:

$$w_0 = w_s + w_{TA} + w_{LA},$$

где преобладающей является энергия возбуждаемой рэлеевской волны.

Энергия ПАВ по мере прохождения в области сопряжения контактной поверхности объекта (ОСП) с передней гранью выступа в процессе трансформации мод перераспределяется между энергией краевых мод (поперечной и продольной) за вычетом энергии отраженной и прошедшей ПАВ. Таким образом, в общем случае результирующее поле поперечных (P_T) и продольных (P_L) волн в объекте представляется в виде:

$$P_T = P_{TA} + P_{TE}, \quad P_L = P_{LA} + P_{LE}, \quad (1)$$

где индекс A относится к сопутствующей моде, E – к краевой моде.

В отсутствие расхождения ПАВ и диссипативных потерь коэффициент преобразования ее по энергии в краевые моды имеет вид:

$$(k_{s/E})_W = 1 - (D_S)_W - (R_S)_W \approx (\kappa_{TE})_W + (\kappa_{LE})_W, \quad (2)$$

где $(D_S)_W$ и $(R_S)_W$ – коэффициенты прохождения и отражения от ОСП выступа по энергии соответственно; $(\kappa_{TE})_W$ и $(\kappa_{LE})_W$ – коэффициенты преобразования по энергии ПАВ в краевую поперечную и продольную моды соответственно.

В частном случае, когда безразмерный радиус ОСП $R_\lambda = R/\lambda_R \gg 1$, где λ_R – длина ПАВ, то представляется возможным получить аналитическое выражение для функции распределенных

по указанной поверхности источников краевых волн, зависящей от положения на радиусном переходе ОСП, определяемом углом θ и радиусом R , где $(k_{s/E})_W = F(R, \theta)$. Элементарный участок радиусного перехода $ds = c_s dt = R d\theta$, проходимый ПАВ за промежуток времени $dt = ds/c_s \ll v^{-1}$, может быть рассмотрен как элементарный источник краевых объемных волн, где v – частота волны. Используя известное выражение для коэффициента ослабления поверхностной волны δ и предположение о радиальном направлении излучения краевых мод [6], получим функцию источников поперечной и продольной моды, плотности энергии которых Ξ_T и Ξ_L соответственно. С учетом принятых допущений и представляя $\delta_\lambda = \delta/\lambda_s$ (где δ_λ – ослабление волны Рэлея на участке пути длиной λ_s), дифференциальное уравнение баланса потоков энергии краевых мод в дифференциальной форме примет вид:

$$dw_s/dt = c_R R^{-1} dw_s/d\theta = - (c_T \Xi_T + c_L \Xi_L), \quad (3)$$

$$\text{где } w_s = \eta \rho^{-1} \frac{(P_{s0})^2}{\tilde{n}_s} \exp(-2R\delta_\lambda \theta / \lambda_s) -$$

параметр, характеризующий энергию потока ПАВ в окрестности $s = R\theta$; P_s – амплитуда давления волны на поверхности ОСП; η – постоянная, зависящая от R_λ и свойств материала. Поскольку

$$\Xi_T \sim \rho^{-1} \frac{P_T^2}{c_T^2}, \quad \Xi_L \sim \rho^{-1} \frac{P_L^2}{c_L^2},$$

то, положив $\kappa^2 = \Xi_L/\Xi_T$, выражения для амплитуды излучаемой краевой поперечной и продольной моды примут вид:

$$P_T = 2p_{s0} \exp(R\delta_\lambda \theta / \lambda_s) (c_T \eta \delta_\lambda)^{0.5} [c_s \lambda_s (1 + \frac{\tilde{n}_T}{\tilde{n}_L})]^{-0.5} = p_L / \kappa. \quad (4)$$

Согласно полученным предварительно опытными данным, уже при $R_\lambda > 1-2$ отражением ПАВ от радиусного перехода выступа можно пренебречь. Используя выражения (2)–(4), можно получить выражение для $(\kappa_{TE})_W$, $(\kappa_{LE})_W$ и, соответственно, для $(\kappa_{s/E})_W$. Таким образом, для данного случая и с учетом сделанных выше предположений поле краевых мод в некоторой точке объема выступа M может быть представлено с точностью до множителя в виде:

$$P_{TL} \sim \left(\int_s F(\omega, t, \tau) \exp[i(\omega t - 2\pi R_\lambda \theta + iR\theta\delta_\lambda)] f_1(\vec{r}) f_2(\phi) ds, \quad (5)$$

где $F(\omega, t, \tau)$ – функция, описывающая форму импульса длительностью τ с угловой частотой $\omega = 2\pi v$, причем для $\omega \rightarrow \infty$ $F \rightarrow 1$; \vec{r} – радиус-вектор, проведенный в точку наблюдения M

из координаты элементарного источника излучения краевой волны на радиусном переходе; $f_1(\bar{r})$ и $f_2(\phi)$ – функции, характеризующие ослабление амплитуды волны с расстоянием и направленность элементарного источника излучения ds .

Таким образом, используя выражения (4) и (5), на основе предложенной модели можно рассчитать результирующее поле в объеме выступа в двумерном приближении, пренебрегая диссипативными процессами и учтя вклад поля сопутствующей моды P_{TA} . Необходимо отметить, что если $R_\lambda \approx 1$ и меньше, то следует ожидать проявление более сложного механизма трансформации мод ($L_E \leftarrow \text{ПАВ} \rightarrow T_E$) и изменения структуры формируемого поля краевой поперечной и продольной моды.

Ниже на первом этапе исследований получим экспериментальные и расчетные данные о влиянии радиусного перехода на формируемое поле в объеме акустической нагрузки типа выступ, когда его угол $\gamma = \pi/2$. На втором же этапе исследуем влияние угла выступа γ на это поле. Третий этап посвящен рассмотрению возможностей использования результатов исследований на практике.

Методические особенности исследований

Экспериментальные схемы проводимых исследований поясняются на рисунках 1 и 2,

где объектом исследований служили стальные цилиндрические образцы радиусом 60 мм с вырезом в виде сектора, угол которого варьировался в диапазоне $\gamma = 35\text{--}180^\circ$. Причем в образцах с углом выступа $\gamma = 90^\circ$ и на его ОСП выполнены радиусные переходы разной величины, что позволяло варьировать безразмерную величину R_λ в диапазоне 0–10,2. Для изучения возможностей выявления дефектов, слабо отражающих звук, были изготовлены образцы с расположенными на разной высоте плоскодонными отражателями и разным радиусом ОСП. Рабочая частота пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) рэлеевских волн $\nu = 1\text{--}3$ МГц.

При исследовании поля трансформированных волн в объеме выступа наклонный ПЭП с магнитным прижимом устанавливался на контактную поверхность образца для излучения ПАВ в направлении ОСП. Источником и приемником недедетированных электрических импульсных сигналов служат электронные блоки генераторов УД2-12, осциллограф С1-71, измеритель временных интервалов И1-8, используемый для синхронизации и анализа параметров акустического сигнала. Изучались особенности трансформации ПАВ в объемные моды и формирования поля рассеяния краевых как поперечных, так и объемных волн.

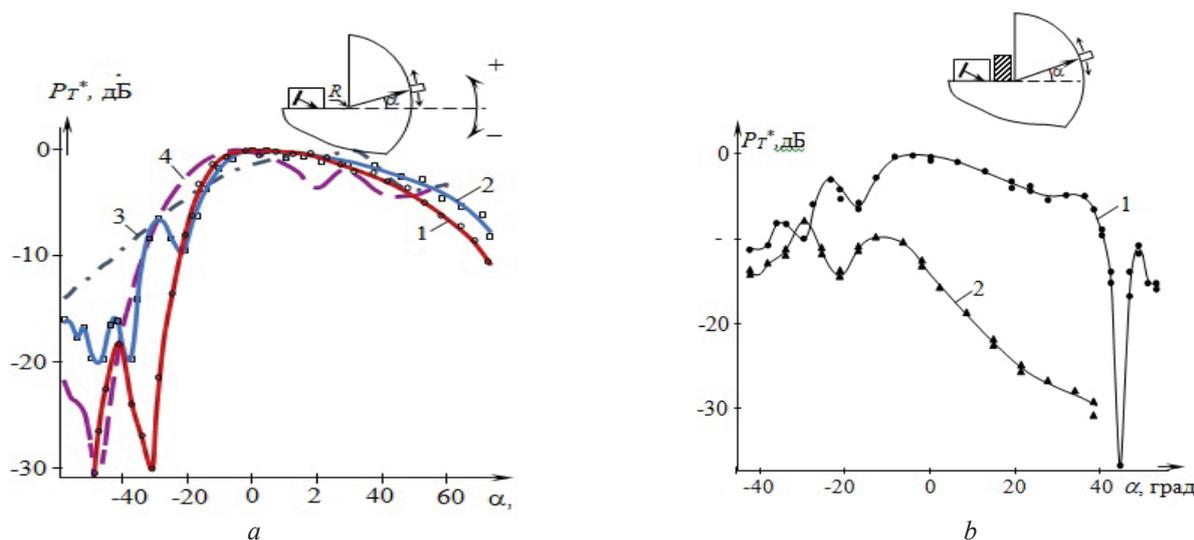


Рисунок 1 – Влияние радиусного перехода выступа (а) и акустической нагрузки на контактной поверхности образца (b) на акустическое поле в объеме образца с выступом. а: $R_\lambda = 7$; ν , МГц = 1(1), 1,8 (2–4); 1, 2 – эксперимент; 3 – расчет для случая одного источника, 4 – расчет для случая двух источников поперечной моды; b: акустическая нагрузка отсутствует (1) и есть (2), $R_\lambda = 0$, ν , МГц = 1,8

Figure 1 – Influence of radius transition of ledge (a) and acoustic loading on the pin surface of specimen (b) on the acoustic field in the volume of the specimen with the ledge. а: $R_\lambda = 7$; ν , MHz = 1(1), 1,8 (2–4); 1, 2 – is an experiment; 3 – is a calculation when an one source of transverse waves to appear, 4 – two sources to be; b: the acoustic loading is absent (1) but exist (2), $R_\lambda = 0$, ν , MHz = 1,8

Для измерения амплитуды поперечной моды служили ЭМА-преобразователи с шириной намотки провода приемника 1 мм, а продольной – контактный ПЭП с апертурой 1,5 мм, фиксируемый на образце с помощью магнитной системы. Последний выполнен с возможностью перемещения по круговой траектории. Для повышения достоверности измерение амплитуды производилось путем сравнения с опорным сигналом, подаваемым на осциллограф от генератора стандартных сигналов. Для сравнительного анализа теоретической модели формирования акустического поля в объекте амплитудно-угловая зависимость поля сопутствующей объемной моды (излучаемой одновременно с ПАВ) представлялась косинусоидальной кривой. Причем угол максимума и угловая ширина поля сопутствующей моды и его угловая полуширина определялись экспериментально. Для этих целей использован образец с идентичной контактной поверхностью в виде полуцилиндра.

При проведении расчетов нормализованной амплитудно-угловой функции поперечной волны в объеме выступа использованы формулы (4) и (5), а также учитывался конкретный размер образца, форма и длительность импульса. Огибающая импульса имеет форму колокола с количеством осцилляций в нем $n=5$. Направленность элементарного источника краевой моды размером ds на поверхности ОПС описывается функцией $f_2(\phi) \sim \cos(b\phi)$, где подгоночный коэффициент b взят равным 0,5. Источник (мнимый) поля сопутствующей моды расположен в плоскости, перпендикулярной акустической оси ее поля излучения и проходящей через точку с координатой $x = z = 0$. Параметры этого источника определялись на основе экспериментальной зависимости поля излучения в образце без выступа.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Поле поперечной волны в объеме выступа с углом $\gamma = 90^\circ$

Результаты экспериментальных исследований прохождения и трансформации ПАВ на объектах с различной геометрией акустической нагрузки в виде выступа приведены на рисунках 1, 2. Причем на рисунке 1а даны сравнительные данные расчета согласно предложенной теоретической модели и данных эксперимента при наличии радиусного перехода на образце

с $R_\lambda \approx 7,2$. На рисунке 2 приведены (для удобства) характерные зависимости полей рассеяния поперечной и продольной волны в полярных координатах для случая, когда $R_\lambda \ll 1$.

Как видно из представленных экспериментальных данных, все исследуемые зависимости нормализованного поля поперечной моды в образце с выступом $P_T^*(\alpha)$ имеют максимум и ассиметричны относительно плоскости $z = 0$. Варьирование радиуса ОСП и частоты волны (или R_λ), положения ПЭП в той или иной мере сопровождается пространственным перераспределением потока акустической энергии, большая часть которого сконцентрирована в области $\alpha > 0$. В то же время смещение угла максимума поля α_{\max} относительно нулевого значения не превышает $\pm(5-10)^\circ$, а изменение амплитуды поля в этом угловом диапазоне не более 2–3 дБ. Обращает на себя внимание поведение зависимости $P_T^*(\alpha)$ в области $\alpha < -(10-15)^\circ$, где при определенных условиях наблюдаются осцилляции поля с амплитудой, достигающей 5–6 дБ, и периодом $\approx 10-15^\circ$, что, как предполагается, является результатом взаимодействия сопутствующей T_A и рассеянной на ОСП выступа краевой T_E моды при прохождении ПАВ. Из результатов исследования вытекает, что наиболее значимым фактором, вызывающим изменение структуры поля в области $\alpha \approx 0$ и выше (что весьма важно для практики), является безразмерный радиус R_λ .

Следует обратить внимание на тот факт, что независимо от рабочей частоты преобразователя поле рассеяния $P_T(\alpha)$ имеет ярко выраженный минимум, достигающий при $R_1 \rightarrow 0$ десятков децибел в окрестности характерного значения угла приема поперечной волны $\alpha \rightarrow \alpha_{\min}$. Причем в исследованном частотном диапазоне изменение последнего не превышает $4-5^\circ$ при погрешности угловых измерений не более 1° . С увеличением же R_λ величина этого минимума резко уменьшается, а угловая ширина амплитудно-угловой зависимости нормализованного поля $P_T^*(\alpha)$, взятая на уровне 6 дБ, возрастает. Так, если $R_\lambda \approx 7,2$ и $R_\lambda \rightarrow 0$, то это возрастание достигает ≈ 2 раз.

На рисунке 1а приведены результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных, выполненных согласно рассмотренной выше (упрощенной) полуэмпирической модели (формулы (1), (4), (5)), представляющей результирующее поле ПЭП как суперпозицию полей сопутствующей и краевой моды. При этом угловая зависимость в виде косинуса, характерная

для функции направленности малоапертурного источника поперечных волн типа длинной полосы, работающего в поршневом режиме и расположенного в окрестности координаты $x = z = 0$, занимает промежуточное положение между экспериментальными кривыми, полученными для $R_\lambda = 0$ и $R_\lambda = 7,2$.

Как установлено, предложенная расчетная модель формируемого поля поперечной моды в образце с углом выступа $\gamma = 90^\circ$ и достаточно большим радиусом ОСП качественно неплохо описывает данные эксперимента в важном для практики ультразвукового контроля угловом диапазоне $-10^\circ < \alpha < 40^\circ$. При этом расхождение опытных данных с расчетными не превышает 1–2 дБ и может быть уменьшено, если для описания поля использовать среднее арифметическое значение функций, рассчитанных с учетом сопутствующей моды и без нее. В то же время отличие расчетных и экспериментальных данных может достигать ≈ 5 –6 дБ в области углов $\alpha < -(10$ –15) $^\circ$, где проявляются интерференционные процессы, обусловленные взаимодействием краевой и сопутствующей моды.

Поле поперечной и продольной волн в объеме выступа с изменяющимся углом γ

Как экспериментально установлено, увеличение R_λ в диапазоне 0–3 практически приводит к нивелированию упомянутого обнаруженного локального минимума поля (минимума первого порядка), достигающего ≈ 20 –30 дБ и наблюдаемых осцилляций при $R_\lambda \rightarrow 0$ и $\gamma = 35$ –135 $^\circ$. Величина же угла $\alpha_{\min} = (\alpha_{\min})_1$ является квазилинейной функцией угла выступа в диапазоне $\gamma = 35$ –135 $^\circ$:

$$\alpha_{\min} = \Theta - \gamma, \quad (6)$$

где Θ – некоторый параметр, величина которого зависит от рабочей частоты волны. Причем для $\gamma \leq 90^\circ$ при варьировании частоты от 1 до 3 МГц величина Θ изменяется в диапазоне 132–137 $^\circ$ при погрешности угловых измерений не более 1 $^\circ$.

Для объяснения обнаруженного характера изменения параметров акустического поля при $R_\lambda \rightarrow 0$ были проведены дополнительные исследования по проверке высказанного предположения о появлении дополнительной поперечной моды, отходящей от поверхности передней грани выступа краевой в результате прохождения по ней краевой головной волны. Последняя же генери-

руется в результате трансформации ПАВ именно на выступе. (С точки зрения физики процесса, появление отходящей поперечной моды обусловлено необходимостью выполнения граничных условий на свободной границе, где тензор напряжений $\sigma_{ik} = 0$).

Для проверки этого предположения на переднюю грань выступа устанавливался приемный ПЭП с переменным углом падения волны β . Установлено, что независимо от γ максимум чувствительности измерений достигается при $\beta = \beta_1 = \arcsin(c_1/c_l) \approx 27^\circ$, что соответствует оптимальным условиям возбуждения (приема) головной волны. Т.е. при трансформации мод на ОСП выступа возбуждается мощный сигнал головной волны [10], трансформированной из ПАВ. Интересно, что в работе [11] подобный эффект был обнаружен для совершенно других условий – когда область возбуждения объемной волны имела вид тонкой полосы, расположенной на плоскости поверхности.

Варьируя в эксперименте угол выступа, было установлено, что максимум амплитуды ППВ достигается при $\gamma \rightarrow 90^\circ$. Учитывая, что ее распространение по передней грани выступа сопровождается отходящей поперечной волной, была предложена полуэмпирическая модель, описывающая результирующее поле, создаваемое тремя источниками:

$$P_T(\alpha) = P_{TE}(\alpha) + P_{TE}^*(\alpha) + P_{TA}(\alpha),$$

где $P_{TE}(\alpha)$ соответствует полю малоапертурного источника краевых волн, локализованного в окрестности ОСП, а $P_{TE}^*(\alpha)$ – полю отходящей от передней грани выступа поперечной моды, непосредственным источником которой (как нами обнаружено) служит краевая головная волна; $P_{TA}(\alpha)$ – поле сопутствующей моды.

Ввиду того, что эффективная апертура источника рассеянных в окрестности ОСП волн не превышает $a \approx \lambda_T$, а радиус цилиндрической поверхности приема волн $r \gg \lambda_T$, то безразмерная волновая зона $l \approx a^2(r\lambda_T)^{-1} \ll 1$. Таким образом, используя представления лучевой акустики и проведя элементарный анализ фазовых сдвигов волн в области их приема, сопоставляя амплитудно-угловые параметры приведенных выше источников, было получено обобщенное выражение для определения значений углов приема поперечной моды, соответствующих локальным экстремумам поля, включая угловой минимум

первого порядка $\alpha_{\min} = (\alpha_{\min})_1$.

Как показали опытные данные, выполненные с использованием образца без выступа, влиянием сопутствующей моды $P_{TA}(\alpha)$ в области $\alpha > 0$ можно пренебречь. Так что необходимым условием появления экстремума результирующего поля является наличие сдвига фаз в точке приема между T_E и T_{E^*} модами $\Delta\psi = m\pi$, где m – целое отрицательное число. При расчете значения α_{\min} (и значений углов других локальных экстремумов) используется формула (6), где:

$$\Theta = 180^\circ + \arctg(d/b) + \arcsin[(n(1 - \chi)(d^2 + b^2)^{-0.5}],$$

$$d = n + \sin\phi; \quad b = \cos\phi; \quad \phi = 33^\circ; \quad n = c_L/c_T; \quad \chi = 0,5mc_T(rv\pi)^{-1}.$$

Как непосредственно следует из (6) и (7), $(\alpha_{\min})_1 \rightarrow 123^\circ - \gamma$, принимая минимальное значение при $\chi \ll 1$, что соответствует бесконечно большому волновому расстоянию, проходимо T_{E^*} модой до точки ее приема. И наоборот, с увеличением χ угол $(\alpha_{\min})_1$ возрастает, что согласуется с данными эксперимента.

Необходимо отметить, что наблюдается неплохое соответствие расчетных и экспериментальных данных (в пределах $\pm 1,5^\circ$), когда $m = -1$, т.е. полученных в предположении более позднего прихода T_{E^*} моды в точку приема с фазовым сдвигом π . Экстремумам же с номерами $m < -1$ (и при $\alpha > (\alpha_{\min})_1$) соответствуют быстро затухающие осцилляции кривой $P_T(\alpha)$, двойной размах амплитуды которых не превосходит 2–3 дБ. Если же угол выступа тупой ($\gamma = 135^\circ$), то, как показывают опытные данные, вклад отходящей T_{E^*} моды в результирующее поле ограничен окрестностью углов приема $\alpha \approx 0$. Это поле зависит преимущественно от пространственного распределения и силы его источников, локализованных в окрестности поверхности передней грани выступа, определяемых амплитудой и законом ослабления ППВ, длительностью импульса τ , частотой волны и геометрией объекта.

Необходимо отметить, что на основании хода зависимостей $P_T(\alpha)$ в окрестности локального минимума можно оценить вклад в результирующее поле отходящей T_{E^*} -моды. При этом учитывается тот факт, что при $\alpha \rightarrow (\alpha_{\min})_1$ в точке приема $P_T \approx P_{TE} - P_{TE^*} \xi$, где ξ – корректирующий коэффициент, учитывающий угол падения T_{E^*} -моды на цилиндрическую поверхность образца с установленным на ней приемным ЭМА-преобразователем. Величина же P_{TE}

получена путем интерполяции зависимости $P_T(\alpha)$ в окрестности угла $(\alpha_{\min})_1$.

Как установлено, наибольшее изменение максимума амплитуды результирующего поля под влиянием отходящей моды достигается при условии, когда $\gamma \rightarrow 90^\circ$. Так, например, для $v = 1,8$ МГц амплитуда T_{E^*} -моды в окрестности $(\alpha_{\min})_1$ всего на 8–10 дБ меньше амплитуды максимума исследуемой функции. При значениях γ , отличных от 90° , влияние этой моды на результирующее поле ослабевает.

Другая важная особенность формируемого результирующего поля поперечной моды в объекте заключается в том, что при $\gamma \leq 90^\circ$, $v = \text{const}$ и $0 \leq \alpha < \alpha_{\min} - \Delta\alpha$ нормализованная зависимость $P_{T^*}(\alpha)$ с погрешностью не более 1–2 дБ может быть аппроксимирована функцией:

$$P_{T^*}(\alpha) = 20\lg(P_T/P_T^{\max}) = 1 - \Lambda\alpha,$$

в которой $\Lambda \approx 0,15$ дБ/град, если $v = 1,8$ МГц.

Что касается структуры поля в области углов приема $\alpha < -10^\circ$, характеризующейся проявлением интерференционных процессов, то она достаточно чувствительна к положению ПЭП относительно выступа. Изменение последнего сопровождается фазовым сдвигом между сопутствующей ($P_{TA}(\alpha)$) и краевой ($P_{TE}(\alpha)$) модой, что и вызывает угловой сдвиг экстремумов результирующего поля и амплитуды волны.

Экспериментально установлено, что коэффициент прохождения волны Рэлея через ОСП выступа в зависимости от его угла $\gamma = 180 - 35^\circ$ уменьшается на ≈ 12 дБ, а коэффициент преобразования энергии ПАВ в краевые объемные моды возрастает на ≈ 90 %. При анализе амплитудно-угловых характеристик исследуемого поля необходимо учесть, что энергия краевых волн при варьировании угла выступа в диапазоне $35^\circ \leq \gamma \leq 135^\circ$ рассеивается по всему объему выступа. В результате этого максимум поля $P_T(\alpha)$ изменяется не более чем на 2–3 дБ, а его угловая ширина на уровне 6 дБ изменяется не более чем на 2–4° в образцах с $\gamma \leq 90^\circ$.

Отметим, что волновой фронт продольной моды в исследуемой области образца имеет структуру, существенно отличающуюся от той, что формируется поперечной модой. Отличительная особенность этих зависимостей заключается в наличии выраженного минимума, лежащего несколько ниже $\alpha = 0^\circ$, и двух максимумов, наибольший из которых расположен в области

$\alpha > 0^\circ$. Смещение глобального максимума в область $\alpha > 0$ с ростом γ достигает $40\text{--}50^\circ$, а различие между этими экстремумами составляет $\approx 6\text{--}10$ дБ. В то же время амплитуда поперечной моды в окрестности $\alpha \approx 0$, превосходит на порядок амплитуду продольной моды.

Прикладные аспекты

Повышение эффективности обнаружения слабо отражающих звук дефектов в объектах сложного профиля

Основные направления использования результатов исследования иллюстрируются на рисунках 3–5. Прежде всего, это касается вопросов контроля широкого спектра объектов с выступами, проточками, галтельными переходами, валиком усиления и др.

Необходимо отметить высокую эффективность использования изученных выше краевых поперечных мод для обнаружения слабо отражающих звук дефектов, расположенных в окрестности углов $\alpha \approx 0^\circ$ или выше, что в значительном числе случаев является актуальным при контроле объектов сложного профиля. При этом прозвучивание объекта поперечной модой производится в совмещенном или раздельно-совмещенном режиме с использованием традиционной схемы типа «дуэт» – путем разворота двух ПЭП по отношению друг к другу на угол 2π . Как показывают результаты исследований, при $R_\lambda \ll 1$ угол между плоскостями падения ПЭП следует выбирать не более $2\pi \approx 80\text{--}100^\circ$, чтобы не допустить значительных потерь энергии волны на отражение и создание шумового фона.

Пример выявления дефектов в образце с выступом одним ПЭП, работающим в режиме эхо, приведен на рисунке 3. Как видно, изменение частоты волны и расстояния до выступа приводит к изменению поля излучения-приема поперечной моды в окрестности углов $\alpha \rightarrow 0$, что и определяет эффективность выявления слабо отражающих звук дефектов. (Отражающая плоскость последних ориентирована вертикально, а их оси лежат в окрестности $z \rightarrow 0$ или выше.) Важно отметить, что изменение относительного радиуса кривизны ОСП в диапазоне $R_\lambda = 0\text{--}7,2$ позволяет обеспечить достаточно высокую чувствительность метода (до $20\text{--}25$ мм²) в стальных изделиях даже при расстоянии ПЭП от выступа,

составляющем в ряде случаев $\approx 0,1$ м и более. (Это обусловлено слабой расходимостью ПАВ в пространстве.)

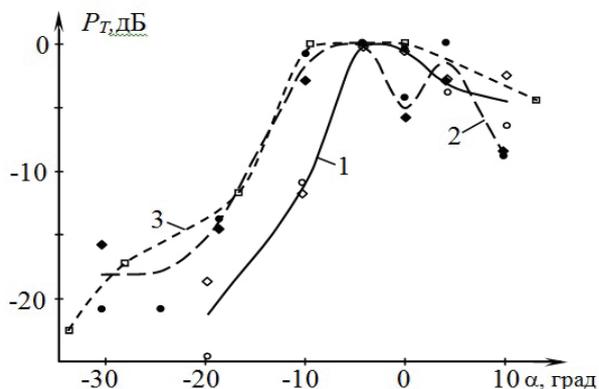


Рисунок 3 – Нормализованная амплитуда поперечной волны, отраженной от плоскодонного отражателя диаметром 4 мм, выполненного в объеме выступа, полученная с использованием пьезоэлектрического преобразователя волны Рэлея на частоте 1,8 МГц: $R, 10^{-3}\text{ м} = 5$ (1); 10 (2); 0 (3); расстояние до выступа $x, 10^{-3}\text{ м} = 20$ (○, ●, □); 48 (◇, ◆)

Figure 3 – Normalized amplitude of the reflected transverse wave from a flat-bottomed reflector by a diameter a 4 mm in the specimen volume with ledge, which was got with the use of of the Rayleigh wave probe when ultrasonic frequency is 1,8 MHz: $R, 10^{-3}\text{ m} = 5$ (1); 10 (2); 0 (3); distance to the ledge of $x, 10^{-3}\text{ m} = 20$ (○, ●, □); 48 (◇, ◆)

На рисунке 4 приведена схема предложенного метода трансформации волн для контроля основного металла фланцевого разъема конвертора в районе технологического выступа «шип-паз» с целью выявления возможного дефекта в области шип-паза (рисунок 4). Этот метод и реализующее его устройство были использованы при разработке методики контроля указанного объекта, внедренной на одном из предприятий нефтегазовой промышленности Республики Беларусь К.А. Филипповым.

Технологически потенциально опасным дефектом (в химическом производстве) является вертикально ориентированная плотно сжатая трещина, расположенная на расстоянии $\approx 0,1$ м, от места расположения источника-приемника зондирующих объект упругих волн. Апробирование известных методик, включая наиболее эффективную из них – с использованием головных волн [10], не позволили достигнуть необходимой чувствительности из-за существенного ослабления амплитуды волны вследствие дифракции. Применение впервые предложенного метода,

основанного на формировании поля краевых поперечных волн, трансформированных из ПАВ на радиусном переходе технологического выступа объекта, позволило в 4–5 раз повысить чувствительность контроля. При этом выбор рабочей частоты (1,8 МГц) определен из условия, обеспечивающего заданную диаграмму направленности поля излучения-приема устройства в вертикальной плоскости и амплитуду колебаний $P_T(\alpha)$. Использование разработанной методики контроля и устройства позволило избежать дорогостоящего демонтажа оборудования и останковки на длительный срок важного химико-технологического процесса.

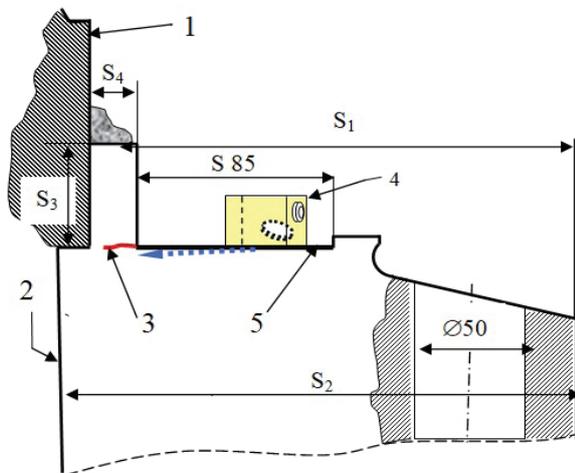


Рисунок 4 – Пример использования эффекта трансформации волн для контроля основного металла фланцевого разъема конвертора в районе технологического выступа «шип-паз»: 1 – конус трубной; 2 – фланец корпуса; 3 – горизонтально ориентированные трещины (отрыв); 4 – акустический блок; 5 – уплотнительная поверхность фланца: $S_i, 10^{-3} \text{ м} = 0,190 (i = 1); 0,226 (i = 2); 0,050 (i = 3); 0,020 (i = 4); 0,085 (i = 5)$

Figure 4 – Example of the use of effect of transformation of waves for testing of basic metal of the flange's socket of converter in the district of technological ledge «thorn-slot»: 1 – is a cone pipe; 2 – is a flange of corps; 3 – are the horizontally oriented cracks (digging up); 4 – is an acoustic block; 5 – is a condensation surface of flange: $S_i, 10^{-3} \text{ м} = 0,19 (i = 1); 0,226 (i = 2); 0,05 (i = 3); 0,02 (i = 4); 0,085 (i = 5)$

Дистанционный метод измерений акустических свойств материалов при воздействии внешних полей, температур и др.

В технике акустических измерений существуют задачи по структуроскопии материалов, определению их физико-механических свойств под воздействием мощных полей, энергетических потоков и др., что существенно ограничивает

возможности применения современных средств акустического контроля вследствие влияния указанных факторов на электронно-акустический тракт и надежность функционирования измерительной системы. Для преодоления этого препятствия может быть использован предложенный подход, заключающийся в расположении источника-приемника упругих волн на достаточно большом удалении (до десятка сантиметров и более) от образца, что поясняется рисунком 5а. Представлена предложенная упрощенная схема измерений, содержащая исследуемый образец и жестко соединенный с ним волновод, выполненный из материала с близким волновым сопротивлением и звукопоглотителем на его донной поверхности. Толщина волновода определяется длиной возбуждаемой волны и выбирается не менее $h = (2-3)\lambda_R$, а длина волновода может быть до $L \approx 0,1 \text{ м}$ и более.

Распространяющаяся по волноводу волна Рэлея трансформируется в области его контакта с образцом в краевые объемные моды. Если диагностика объекта производится сугубо поперечной модой (скорость c_T и амплитуда p_T), то отражающая поверхность исследуемого образца плоская. Последней придают цилиндрическую форму, если требуется анализировать акустические параметры как поперечной, так и продольной моды. В этом случае при трансформации ПАВ возбуждаются краевые поперечные и продольные моды, которые после отражения от оппозитной поверхности образца обратно трансформируются на ОСП в волну Рэлея и принимаются ПЭП с временной задержкой $t_s \approx 2R[(c_T)^{-1} - (c_L)^{-1}]$. Благодаря ей обеспечивается раздельный прием объемных мод и нивелирование шумового фона.

Скорость той или иной моды C_{TL} определяется из выражения $C_{TL} = 2 R(\Delta t_{TL})^{-1}$, где $\Delta t_{TL} = t_{TL} - t_0 + \Delta t_{TL}$; t_0 – время прихода отраженной ПАВ от границы контакта волновода с образцом, а t_{TL} – отраженной объемной моды; Δt_{TL} – некоторая временная поправка. В ряде случаев абсолютная скорость объемных мод может быть определена с погрешностью до $\sim 0,1 \%$, а чувствительность к воздействию на образец фактору – $\sim 0,01 \%$. Достоинство такой методики состоит и в достаточной простоте реализации измерения на разных частотах, а также возможности прозвучивания образца поперечными волнами разной поляризации, что достигается выполнением волновода заданной геометрии.

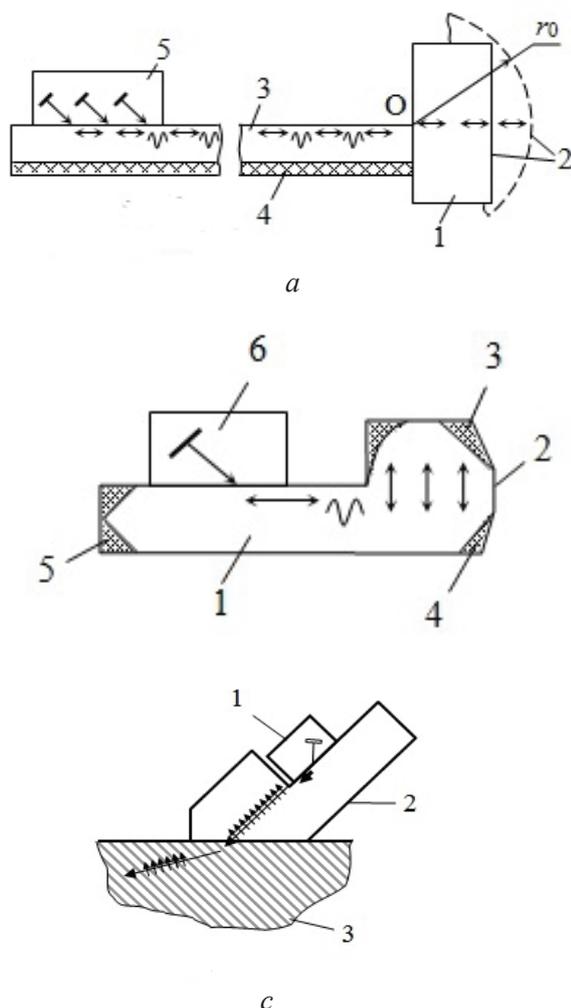


Рисунок 5 – Трансформация мод для ультразвуковых измерений: *a* – дистанционное измерение скорости и амплитуды сдвиговой и продольной моды; *b* и *c* – для возбуждения-приема сдвиговых волн. *a*: 1 – исследуемый объект с отражающей поверхностью 2; 3 – волновод ПАВ с поглотителем паразитных мод; 4 – поглотитель паразитных мод; 5 – источник ПАВ; *b*: 1 – волновод; 2 – рабочая поверхность устройства; 3–5 – поглотители паразитных мод; 6 – ПЭП; *c*: 1 – ПЭП; 2 – волновод-трансформатор мод; 3 – исследуемый объект

Figure 5 – Transformation of acoustical modes for the ultrasonic measuring of materials: *a* – to measure of speed and amplitude of transverse and longitudinal modes when ultrasonic probe is far from the specimen; *b* and *c* – for the excitation-reception of transverse waves. *a*: 1 – is the investigated object with a sound reflected surface 2; 3 – is a waveguide of surface waves with the absorber of parasite modes; 4 – absorber of the noise modes; 5 – is a source of wave; *b*: 1 – is a waveguide; 2 is a working surface of ultrasonic device; 3–5 – are the absorbers of parasite modes; 6 – ultrasonic device; *c*: 1 – ultrasonic probe; 2 – is a waveguide-transformer of modes; 3 – is the object to study

Источники и приемники локализованных вертикально поляризованных волн

Как экспериментально установлено, эффективность преобразования энергии ПАВ в поперечную моду может составить $\sim 70\%$, а отраженной ПАВ – не более нескольких процентов. Возможности использования эффекта трансформации поверхностной волны в объемные и обратно в качестве локальных источников-приемников различным образом поляризованных поперечных волн поясняются на рисунках 5 *b, c*. Путем выполнения волновода (включая область трансформации мод в виде выступа заданной геометрии) представляется возможным реализовать ряд достаточно простых и надежных схем ультразвуковых измерений. В частности, это касается излучения-приема упругих мод на разных частотах, что легко достигается путем размещения на контактной поверхности волновода ПЭП разной частоты и работающих отдельно или с определенной временной задержкой Δt_i между соседними источниками. Управляя расположением источников ПАВ на волноводе, работающих на разных частотах друг относительно друга, представляется возможным легко формировать акустические сигналы с достаточно сложным спектром, что представляет интерес для целей ультразвуковой спектроскопии. Кроме того, особенность таких источников заключается в возможности ввода в объект поперечных колебаний высокой плотности по энергии и разной поляризации.

Заключение

Проведен теоретический анализ и экспериментальные исследования трансформации волны Рэлея в краевые поперечные вертикально поляризованные и продольные моды и рассеяния их в объеме стальных образцов выступа при изменении угла выступа в диапазоне $35\text{--}180^\circ$, безразмерного радиуса кривизны его радиусного перехода в диапазоне $0\text{--}10,2$, а также представлены рекомендации по использованию результатов работы для ультразвукового контроля и измерений.

Установлено, что результирующее в объеме выступа поле поперечной моды в общем случае является асимметричным и представляет суперпозицию полей краевых мод, включая преобладающее поле рассеянной непосредственно на радиусном переходе выступа моды и поле отходящей от передней грани выступа под углом 33° к ней моды, генерируемой краевой головной волной,

а также поля сопутствующей моды, излучаемой преобразователем одновременно с волной Рэлея.

Установлено, что структура поля краевой поперечной моды в образце с $\gamma = 90^\circ$ претерпевает изменение с увеличением безразмерного радиуса радиусного перехода выступа в диапазоне 0–10,2. При этом увеличивается угловая ширина поля, взятая на уровне 6 дБ, практически в 2 раза, а также смещается максимум поля в область больших значений углов приема волны. Обнаруженные же осцилляции поля с амплитудой до ≈ 5 –6 дБ в области углов приема $\alpha \approx - (10$ –15) $^\circ$ и менее вызваны преимущественно взаимодействием сопутствующей и краевой моды, рассеянной непосредственно в области радиусного перехода.

Предложена полуэмпирическая модель формирования поля краевых поперечных вертикально поляризованных волн в объеме прямоугольного выступа с безразмерным радиусом сопряжения контактной поверхности и передней грани выступа (≈ 6 –7 и более) в области углов приема моды от 40° до $-(10$ –15) $^\circ$ наблюдается неплохое соответствие (1–2 дБ) между данными эксперимента и расчета. В отсутствие радиусного перехода результирующее поле поперечных волн в объеме выступа имеет максимум в окрестности продолжения контактной поверхности образца, смещающийся на 5 – 7° при варьировании угла выступа в диапазоне 35 – 135° , а также ярко выраженный минимум первого порядка (20–30 дБ), угол приема которого убывает по линейному закону в этом диапазоне, что согласуется с расчетными данными в пределах 1 – $1,5^\circ$. Структура же поля краевой продольной моды имеет существенное отличие от поля поперечной моды, заключающееся в наличии двух ярко выраженных максимумов и минимума поля, лежащего в диапазоне углов от -10 до -20° .

Представлены результаты исследования влияния углового положения искусственных вертикально ориентированных плоскодонных отражателей в образце с выступом и различным радиусным на амплитуду эхо-сигнала поперечной моды, показавшие эффективность применения в качестве первичного источника зондирующего сигнала ПЭП волны Рэлея для контроля объектов с технологическими выступами.

Даны рекомендации и предложены направления использования результатов исследований включая следующие:

– выявление слабо отражающих звук дефектов;

– дистанционное измерение акустических свойств материалов на разных частотах, и находящихся под воздействием мощных внешних воздействий (электромагнитные поля, давление, температура и др);

– новый способ излучения и приема поперечных волн.

Работа выполнена при частичной поддержке Белорусского Республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках договора № Т17-159 от 18.04.2018.

This work was carried out with the partial support of the Belarusian Republican Fund of fundamental investigations within the bounds of contract no. T17-159 of 18.04.2018.

Список использованных источников

1. Pecorary, C. Scattering of a Rayleigh wave by a surface-breaking crack with faces in partial contact / C. Pecorary // Wave motion. – 2001. – Vol. 33. – P. 259–2701.

2. Базулин, Е.Г. Определение типа дефекта по изображениям, полученным методом *c-saft*, с учетом трансформации типов волн при отражении ультразвуковых импульсов от неровных границ объекта контроля / Е.Г. Базулин // Дефектоскопия. – 2011. – № 1. – С. 23–33. doi: 10.1134/S1061830911010037

3. Ушаков, В.М. Апробация ультразвукового метода измерения размеров усталостных трещин в сталях для оценки скорости их развития в процессе эксплуатации / В.М. Ушаков, Е.И. Мамаева // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 9. – С. 58–65.

4. Баев, А.Р. Трансформация и рассеяние поверхностных волн на акустической нагрузке для ультразвукового контроля и измерений. Ч. 1. Скользящая граница / А.Р. Баев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2018. – Т. 9, № 1. – С. 28–39. doi: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-28-39

5. Полупан, А.В. Ультразвуковой контроль поверхностными волнами / А.В. Полупан. – М.: Спектр, 2014. – 120 с.

6. Бирюков, С.В. Поверхностные акустические волны в неоднородных средах / С.В. Бирюков, Ю.В. Гуляев, В.В. Крылов, В.П. Плесский. – М.: Наука, 1991. – 415 с.

7. Данилов, В.Н. К расчету характеристик трансформации поперечных и продольных волн на отражателях с плоскими поверхностями / В.Н. Данилов // Дефектоскопия. – 2010. – № 9. – С. 31–39. doi: 10.1134/S1061830910090068

8. Аббакумов, К.Е. Влияние нарушения акустического контакта на распространение волн Стоунли вблизи границы твердых полупространств /

К.Е. Аббакумов, Р.С. Коновалов // Дефектоскопия. – 2008. – № 3. – С. 52–58. doi: 10.1134/S10

9. Baev, A.R. Excitation and propagation of subsurface vertically polarized transverse waves / A.R. Baev, P.P. Prokhorenko, M.V. Asadchaya; Review of Quantitative Nondestructive Evaluation // Melville, New York, AIP Conf. Proc. / Review of Quantitative Nondestructive Evaluation. – 2005. – Vol. 24. – P. 91–96.

10. Разыграев, Н.П. Ультразвуковая дефектоскопия головными волнами – физические предпосылки и практическое применение / Н.П. Разыграев // Дефектоскопия. – 2004. – № 9. – С. 27–37.

11. Люткевич, А.М. Акустические поля малоапертурных преобразователей. Поперечные волны, излучаемые прямоугольным источником нормальной силы / А.М. Люткевич, А.В. Жуков, А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин // Контроль. Диагностика. – 2004. – № 4. – С. 3–8.

Reference

1. Pecorary C. Scattering of a Rayleigh wave by a surface-breaking crack with faces in partial contact. *Wave motion*, 2001, vol. 33, pp. 259–2701.

2. Bazulin E.G. Determining the Flaw Type from Images Obtained by the C-SAFT Method with Account for Transformations of Wave Types upon Reflections of Ultrasonic Pulses from the Irregular Boundaries of a Test Object. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2011, vol. 47, no. 1, pp. 30–44. doi: 10.1134/S1061830911010037

3. Ushakov V.M., Mamaeva E.I. [Testing of the ultrasonic method of measuring the size of fatigue cracks in steels to estimate the rate of development during the operation]. *Kontrol'. Diagnostika* [Testing. Diagnostics], 2012, no. 9, pp. 58–65 (in Russian).

4. Baev A.R., Panteleenko F.I., Zakharenko V.V., Razmyslovich G.I., Lark K.G., Gill N.N. 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, vol. 9, no. 1, pp. 28–39 (in Russian). doi: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-28-39

5. Polupan A.V. *Ul'trazvukovoj kontrol' poverkhnostnymi volnami* [Ultrasonic testing by surface waves]. Moscow, Spektr Publ., 2014, 120 p. (in Russian).

6. Birjukov S.V., Guljaev Ju.V., Krylov V.V., Plesski V.P. *Poverkhnostnye akusticheskie volny v neodnorodnykh sredakh* [Surface acoustic waves in inhomogeneous mediums]. Moscow, Nauka Publ., 1991, 415 p. (in Russian).

7. Danilov V.N. On the Calculation of the Transformation Characteristics of Transverse and Longitudinal Waves at Reflectors with Flat Surfaces. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2009, vol. 46, no. 9, pp. 664–676. doi: 10.1134/S1061830910090068

8. Abbakumov K.E., Konovalov R.S. Influence of a Loss in the Acoustic Contact on the Propagation of Stoneley Waves near the Boundary between Solid Half-Spaces. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2008, vol. 44, no. 3, pp. 196–201. doi: 10.1134/S10

9. Baev A.R., Prokhorenko P.P., Asadchaya M.V. Excitation and propagation of subsurface vertically polarized transverse waves. *Melville, New York, AIP Conf. Proc. Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2005, vol. 24, pp. 91–96.

10. Razygraev N.P. Ultrasonic Nondestructive Testing by Head Waves: Physical Prerequisites and Practical Use., 2004, vol. 40, no. 9, pp. 593–601.

11. Ljutkevich A.M., Zhukov A.V., Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G. [Acoustical fields of the probes with small aperture. Transverse waves, radiated by rectangular source of the normal force]. *Kontrol'. Diagnostika* [Testing. Diagnostics], 2004, no. 4, pp. 3–8 (in Russian).

УДК 699.81:519.2:006.83

Риск-ориентированный подход к разработке методик контроля

Серенков П.С.¹, Гуревич В.Л.², Мовламов В.Р.², Етумян А.С.³

¹Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

²Белорусский государственный институт метрологии,
Старовиленский тракт, 93, г. Минск 220053, Беларусь

³Научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России,
микрорайон ВНИИПО, 12, г. Балашиха 143903, Московская область, Россия

Поступила 20.03.2018

Принята к печати 24.04.2018

Необходимость научно-методической проработки методик контроля характеристик огнестойкости строительных конструкций (СК) имеет наивысший приоритет в области обеспечения пожарной безопасности. Целью данной работы являлось обеспечение требуемой степени достоверности результатов контроля качества огнестойких покрытий строительных конструкций и высокой эффективности принимаемых решений за счет риск-ориентированного подхода к разработке методики контроля.

Обоснован риск-ориентированный подход к разработке методики контроля, предполагающий рассмотрение на базе процессной модели контроля огнестойкости строительного объекта всех возможных потенциальных проблем, которые могут вызвать риск некорректного принятия решения. Разработана модель рисков, возникающих при контроле толщины огнезащитного покрытия. Идентифицированы две основные группы рисков. Первая группа связана с неопределенностью измерения толщины покрытия в единичной точке контроля. Вторая группа рисков связана с нерепрезентативностью выборочного контроля всей поверхности строительного объекта в целом. Для каждой группы определены потенциальные источники рисков. Для всего комплекса источников частных рисков приведены результаты исследований механизмов их проявления, оценена степень влияния на достоверность контроля соответствия толщины огнезащитного покрытия требованиям. Анализ проведен на основе как теоретических, так и экспериментальных статистических исследований на ряде строительных объектов.

По результатам анализа всех частных рисков достоверности контроля предложены рациональные пути их минимизации в виде технических или организационно-технических мер, нашедших отражение в разработанном проекте методики контроля. Проект методики контроля построен на основе согласованной схемы контроля толщины огнезащитного покрытия строительных конструкций последовательно тремя сторонами.

Сформулирована и решена метрологическая задача контроля толщины огнезащитного покрытия как косвенное измерение неразрушающими методами толщинометрии. Рассмотрены теоретические и прикладные аспекты процесса контроля толщины огнезащитного покрытия строительных конструкций в условиях высокого риска принятия некорректного решения по результатам контроля.

Ключевые слова: строительные конструкции, огнезащитное покрытие, методика контроля толщины покрытия, риск-ориентированный подход, источники риска недостоверного контроля.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-155-166

Адрес для переписки:

Мовламов В.Р.
Белорусский государственный институт метрологии,
Старовиленский тракт, 93, г. Минск 220053, Беларусь
e-mail: mls@belgim.by

Address for correspondence:

Movlamov V.R.
Belarusian State Institute of Metrology,
Starovilensky Trakt, 93, Minsk 220053, Belarus
e-mail: mls@belgim.by

Для цитирования:

Серенков П.С., Гуревич В.Л., Мовламов В.Р., Етумян А.С.
Риск-ориентированный подход к разработке методик контроля.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 2. – С. 155–166.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-155-166

For citation:

Serenkov P.S., Hurevich V.L., Movlamov V.R., Yetumyan A.S.
[The risk-oriented approach to the development of control met].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 2, pp. 155–166 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-155-166

The risk-oriented approach to the development of control method

Serenkov P.S.¹, Hurevich V.L.², Movlamov V.R.², Yetumyan A.S.³

¹Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

²Belarusian State Institute of Metrology,
Starovilensky Trakt, 93, Minsk 220053, Belarus

³Federal State-Financed Establishment, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters,
VNIPO, 12, Balashikha 143903, Moscow region, Russia

Received 20.03.2018

Accepted for publication 24.04.2018

Abstract

The necessity for scientific and methodical study of methods for monitoring the characteristics of flame-resistance of building structures has the highest priority in the field of fire safety. The aim of this work was to provide the required degree of reliability of the results of quality control of flame-resistant coatings of building structures and high efficiency of decisions due to the risk-based approach to the development of control methods.

Substantiated risk-based approach to the development of methods of control, involving the consideration on the basis of process model, control flame-resistance of building object in all possible potential problems that can cause the risk of incorrect decision-making. A model of the risks arising from the control of the flame-retardant coating thickness has been developed. Two major risk groups have been identified. The first group is related to the uncertainty of coating thickness measurement at a single control point. The second group of risks is related to the unrepresentativeness of selective control over the entire surface of the construction object as a whole. Potential risk sources have been identified for each group. For the entire range of sources of particular risks the results of studies of the mechanisms of their manifestation, the estimated degree of influence on the accuracy of the control of compliance of flame-retardant coating thickness requirements. The analysis is carried out on the basis of both theoretical and experimental statistical studies on a number of construction projects.

According to the results of the analysis of all particular risks of control unreliability, rational ways of their minimization in the form of technical or organizational and technical measures, which are reflected in the developed project of the control method, are proposed. Project control method was built on the basis of a agreed scheme of control of the thickness of the flame-retardant coating of building structures sequentially the three parties.

Formulated and solved the task of the metrological control of the thickness of the flame-retardant coating as indirect measurement methods non-destructive thickness measurements. Theoretical and applied aspects of the process of flame-retardant coating thickness control of building structures under conditions of high risk of making incorrect decisions on the results of control are considered.

Keywords: building constructions, flame-retardant coating, coating thickness control method, risk-oriented approach, sources of risk of unreliable control.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-155-166

Адрес для переписки:

Мовламов В.Р.
Белорусский государственный институт метрологии,
Старовиленский тракт, 93, г. Минск 220053, Беларусь
e-mail: mls@belgim.by

Address for correspondence:

Movlamov V.R.
Belarusian State Institute of Metrology,
Starovilensky Trakt, 93, Minsk 220053, Belarus
e-mail: mls@belgim.by

Для цитирования:

Серенков П.С., Гуревич В.Л., Мовламов В.Р., Етумян А.С.
Риск-ориентированный подход к разработке методик контроля.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 2. – С. 155–166.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-155-166

For citation:

Serenkov P.S., Hurevich V.L., Movlamov V.R., Yetumyan A.S.
[The risk-oriented approach to the development of control met].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 2, pp. 155–166 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-155-166

Введение

В настоящее время существует множество различных способов снижения пожарной опасности и обеспечения требуемых пределов огнестойкости СК с использованием средств огнезащиты: обетонирование, оштукатуривание поверхностей, заполнение внутренних полостей СК негорючими материалами и др. [1, 2]. Наиболее широкое распространение получил способ оштукатуривания поверхностей СК, заключающийся в нанесении специального огнезащитного состава (ОС) на поверхности СК [3].

СТБ 11.03.02¹ регламентирует семь различных групп огнезащитной эффективности ОС, для каждой из которых определен временной норматив от начала огневого воздействия до достижения критической для стали температуры, показывающий, сколько минут СК должна гарантированно выстоять и не обрушиться в условиях огневого воздействия. Для каждого временного норматива регламентирована минимальная толщина специального огнезащитного состава, она же и является контролируемым показателем пожарной безопасности СК.

Следует отметить, что в настоящее время на территории Республики Беларусь и ближнего зарубежья вопрос о контроле толщины огнезащитного покрытия методологически не проработан. МЧС Республики Беларусь поставил задачу техническому комитету по стандартизации ТК ВУ 35 «Средства обеспечения пожарной безопасности и пожаротушения. Требования в области обеспечения пожарной безопасности» разработать методические указания по контролю толщины огнезащитного покрытия СК с учетом высокого риска принятия некорректного решения по результатам контроля.

Цель работы – обеспечить требуемую степень достоверности результатов контроля качества огнестойких покрытий строительных конструкций и высокую эффективность принимаемых решений за счет риск-ориентированного подхода с разработке методики контроля.

¹Система стандартов пожарной безопасности. Средства огнезащитные. Общие технические требования и методы испытаний: СТБ 11.03.02-2010. – Введ. 01.07.2011. – Минск : НИИ ПБ и ЧС МЧС Беларуси, 2010. – 38 с.

Описание объекта контроля. Модель измерения качества покрытия

В качестве объектов контроля выступают строительные объекты (СО), в состав которых входят деревянные, железобетонные, металлические и другие СК [4]. Предметом контроля является толщина огнезащитного состава. Огнезащитное покрытие представляет собой наносимый на подложку, в качестве которой выступает поверхность СК, слой грунта толщиной h_r и слой ОС толщиной h_c (рисунок 1).

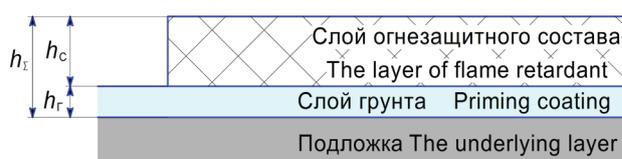


Рисунок 1 – Структура огнезащитного покрытия: h_{Σ} – суммарная толщина огнезащитного покрытия; h_r – толщина грунтового материала; h_c – толщина огнезащитного состава

Figure 1 – Flame-retardant coating construction: h_{Σ} – the total thickness of flame-retardant coating; h_r – the thickness of priming coating; h_c – the thickness of flame retardant

Среди большого многообразия методов контроля наиболее предпочтительны методы и средства неразрушающего контроля. Основные их преимущества – высокая производительность, невысокая трудоемкость, сохранение целостности покрытия [5, 6].

Особенностью контроля толщины огнезащитного покрытия является тот факт, что мы имеем дело с косвенными измерениями. Непосредственно измерению подлежит параметр h_{Σ} , представляющий собой сумму толщин h_c слоя ОС и h_r слоя грунта (рисунок 1):

$$h_{\Sigma} = h_r + h_c. \quad (1)$$

Для заключения о соответствии толщины h_c ОС требованиям ($h_c \geq [h_c]$) измеренную толщину h_{Σ} проверяют через соотношение:

$$h_{\Sigma} \geq [h_{\Sigma \text{ ном}}], \quad (2)$$

где $[h_{\Sigma \text{ ном}}]$ – критическое значение толщины покрытия, т.е. граница контроля, которая рассчитывается по формуле:

$$[h_{\Sigma}] = [h_r] + [h_c], \quad (3)$$

где $[h_r]$ – допускаемое значение толщины слоя грунта.

Вероятностная модель рисков некорректного контроля

С учетом требований ТК ВУ 35 при разработке методики контроля мы исходили из того, что результаты контроля имеют высокий риск некорректного принятия решения в силу недоверности результатов измерений.

Для идентификации источников рисков мы применили риск-ориентированный подход к раз-

работке методики контроля, предполагающий рассмотрение на базе процессной модели контроля СО всех возможных потенциальных проблем, которые могут вызвать риск некорректного принятия решения². Разработана двухуровневая вероятностная модель рисков, возникающих при контроле толщины огнезащитного покрытия. Идентифицированы две группы рисков, источники возникновения которых приведены на рисунке 2. Рассмотрим источники возникновения рисков и пути их минимизации.

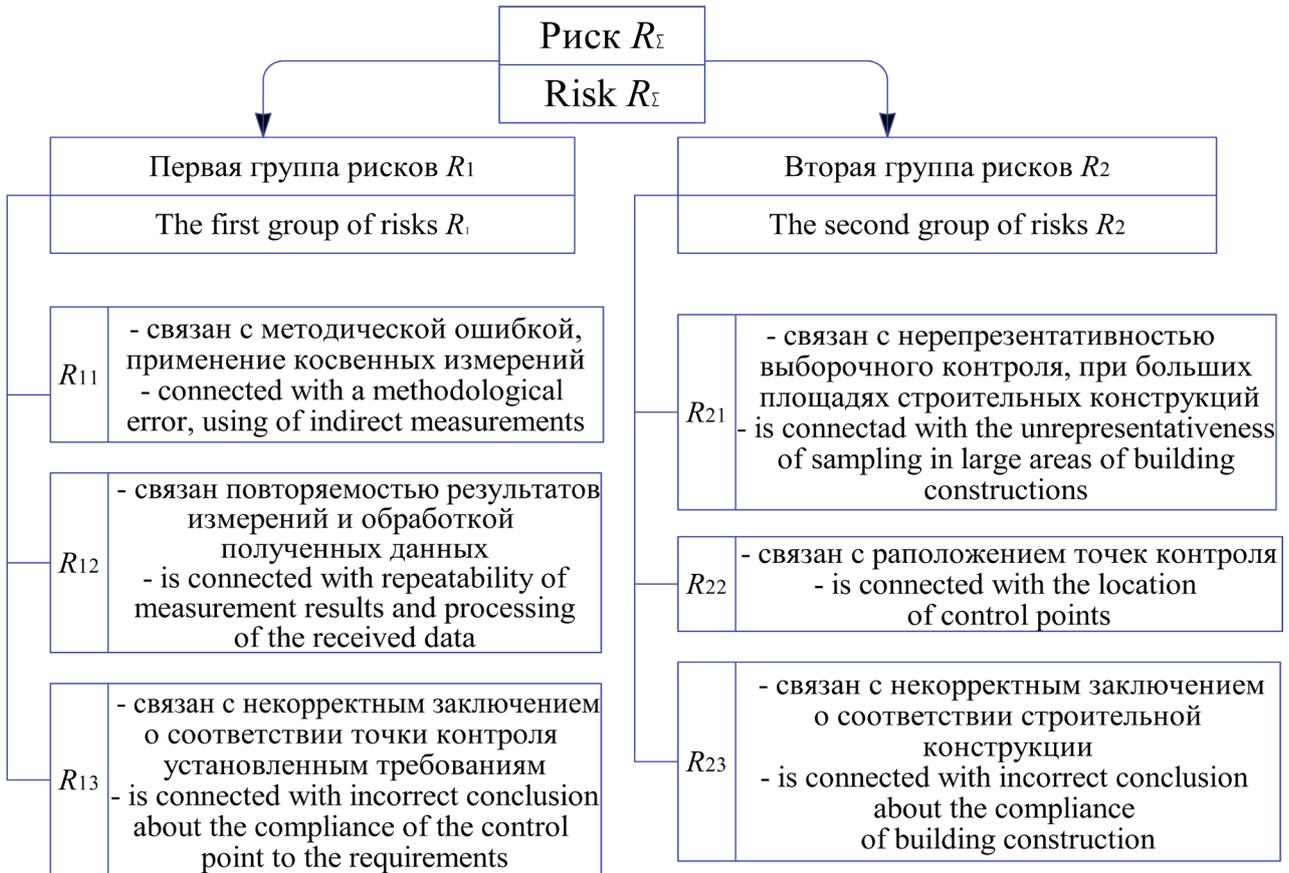


Рисунок 2 – Вероятностная модель рисков некорректного контроля толщины огнезащитного покрытия
Figure 2 – A probabilistic risk model of unreliable control of the thickness of the flame-retardant coating

Риски первой группы. Минимизация рисков первой группы

Риски первой группы связаны с неопределенностью измерения толщины покрытия в единичной точке контроля СК (рисунок 3). Общепринято, что точка контроля – пятно (как правило, квадрат 50×50 мм), в котором проводится определенное количество измерений.

С первой группой рисков связана ситуация, когда исследуемая точка контроля, по факту удовлетворяющая установленным требованиям, принимается как несоответствующая и наоборот. Идентифицированы три источника рисков первой группы.

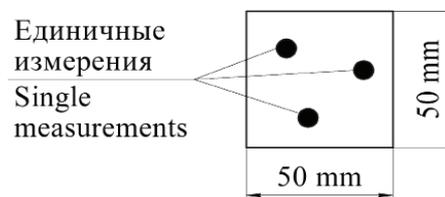


Рисунок 3 – Точка контроля, расположенная на поверхности строительной конструкции
Figure 3 – Control point located on the surface of building construction

²Система менеджмента качества. Требования: СТБ ISO 9001-2015. – Введ. 01.03.2016. – Минск : Беларус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2016. – 36 с.

Риск R_{11} связан с дефинитной неопределенностью значения толщины слоя грунта h_T , входящего в формулу (1). В процессе измерения толщины огнезащитного покрытия h_Σ методами неразрушающего контроля отсутствует возможность прямого измерения действительного значения толщины слоя грунта h_T (рисунок 1). Установившаяся практика контроля предполагает, что в формулы (1) и (3) подставляется номинальная толщина грунта, соответствующая технологической документации нанесения покрытий. Очевидно, что несоответствие номинального и действительного значений толщины грунта вносит существенный вклад в неопределенность расчетного значения h_Σ и, соответственно, способствует повышению риска некорректного контроля.

Предложен организационно-технический подход к минимизации данного источника риска. Производителю огнезащитных работ предписано производить сплошной контроль толщины наносимого грунта. Данные контроля (протоколы контроля) производитель предъявляет генподрядчику (второй стороне) и представителю МЧС (третьей стороне) для приемочного контроля качества огнезащитных работ, в процессе которого они используют в формуле (1) действительные значения h_T .

Риск R_{12} связан со статистической неуправляемостью процесса нанесения покрытий. Для исследования возникновения данного источника риска были проведены статистические исследования на одном из строительных объектов, где в качестве объекта контроля выступила СК типа «колонна». Фрагмент результатов измерений толщины h_Σ огнестойкого покрытия приведен в таблице 1.

Таблица 1/Table 1

Фрагмент результатов измерений толщины h_Σ огнестойкого покрытия строительной конструкции типа «колонна»

Fragment of the measurement results of the flame-retardant coating thickness h_Σ of building constructions type «column»

Количество повторений The number of repeated measurements	Точка контроля, мкм Control point, μm						
	1	2	3	4	5	...	20
1	393	352	584	415	328	...	222
2	220	377	340	598	369	...	198
3	230	415	960	297	195	...	215
Среднее Average value	281	381	628	437	297	...	212
Медиана Median	230	377	584	415	328	...	215

Статистические исследования полученного массива данных проводились методом дисперсионного анализа в соответствии с СТБ ИСО 5725-3³. Исследовалась оценка стандартного отклонения воспроизводимости и повторяемости результатов измерений. Результаты дисперсионного анализа приведены в таблице 2.

Таблица 2/Table 2

Результаты дисперсионного анализа толщины h_Σ огнестойкого покрытия строительной конструкции типа «колонна»

The results of variance analysis of the flame-retardant coating thickness h_Σ of building constructions type «column»

Источник вариации Source of variation	SS (сумма квадратов) sum of squares	Df (степени свободы) degree of freedom	MS (средний квадрат) average square	Математическое ожидание среднего квадрата Expectation of the average square
Между группами Between groups	462025,3	19	24317,12	48258,39
Внутри групп Within the group	532309,3	40	13307,73	37249
Сумма Sum	994334,6	59		

Результаты свидетельствуют, что вариация средних значений толщин покрытия в разных точках контроля по площади объекта (стандартное отклонение воспроизводимости $\sigma_R = 195$ мкм), соизмерима с вариацией результатов повторных измерений в одной точке контроля (стандартное отклонение повторяемости $\sigma_r = 193$ мкм) (рисунок 3). Это доказывает, что процесс нанесения огнезащитного покрытия статистически неуправляем даже в пределах локального участка поверхности СК. Следовательно, дефинитная неопределенность измеренного значения толщины огнезащитного покрытия h_Σ в одной точке контроля относительно велика и вносит существенный вклад в неопределенность расчетного значения h_Σ , способствуя тем самым повышению риска некорректного контроля.

³Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 3. Промежуточные показатели прецизионности стандартного метода измерений: СТБ ИСО 5725-3-2002. – Введ. 01.07.2003. – Минск : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2003. – 36 с.

Для минимизации влияния данного источника риска рекомендовано проводить в одной точке контроля не менее трех повторных измерений (рисунок 3), а в качестве результата измерения в точке контроля следует принимать не среднее значение из трех, а медиану – как робастную характеристику, что рекомендовано в подобных случаях в СТБ ИСО 5725-5⁴.

Риск R_{13} связан с некорректным заключением о соответствии толщины огнезащитного покрытия в единичной точке контроля установленным требованиям формулы (2) по результатам измерений, что ассоциируется с классической задачей контроля и рисками поставщика α и потребителя β . Аналитический подход к решению данной задачи

предполагает расчет вероятности недостоверного оценивания на основе комбинирования закона распределения толщины покрытия на всей поверхности СК и закона распределения неопределенности результата измерений в единичной точке контроля⁵.

Для обоснования выбора методов оценивания и минимизации риска данного типа было проведено статистическое исследование технологического процесса нанесения покрытия на поверхность СК. Был реализован иерархический план эксперимента с полной группировкой влияющих факторов³, где объектом контроля выступил объект типа «поверхность». Фрагмент результатов статистического исследования толщины огнестойкого покрытия приведен в таблице 3.

Таблица 3/Table 3

Результаты измерений толщины огнестойкого покрытия объекта типа «поверхность» в соответствии с иерархическим планом эксперимента с полной группировкой влияющих факторов, мкм

The measurement results of the flame-resistant coating thickness of the object type «surface» in accordance with the hierarchical plan of the experiment with a complete grouping of influencing factors, μm

Тип поверхности Type of surface	Объект малой величины Object of low value		Объект большой величины Object of great value		Объект средней величины Object of medium value		Объект малой величины Object of low value	
	Стена Wall	Преграда Barrier	Занавес Curtain	Лестничные марши Staircases	Преграда Barrier	Перекрытие Overlap	Стена Wall	Люк Hatch
Результаты контроля, мкм Control results, μm	393	1219	750	960	393	747	449	325
	220	1141	884	288	220	1008	225	346
	230	1150	758	415	230	605	300	524
	215	1544	1218	598	215	1010	272	340
	272	628	679	584	908	399	929
	364	684	817	981	364	849	352	538

Статистический анализ результатов исследования показал, что технологический процесс нанесения покрытия на поверхности

СК является статистически неуправляемым, так как индекс воспроизводимости $C_p < 1,33$ (таблица 4).

⁴Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 5. Альтернативные методы определения прецизионности стандартного метода измерений: СТБ ИСО 5725-5-2002. – Введ. 01.07.2003. – Минск : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2003. – 58 с.

⁵Государственная система обеспечения единства измерений. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм: ГОСТ 8.051-81. – Введ. 01.01.82. – М. : Издательство стандартов, 1982. – 11 с.

Таблица 4/Table 4

Результаты статистического анализа процесса нанесения покрытия
The results of the statistical analysis of the coating process

Тип поверхности Type of surface	Объект малой величины Object of low value		Объект большой величины Object of great value		Объект средней величины Object of medium value		Объект малой величины Object of low value	
	Стена Wall	Преграда Barrier	Занавес Curtain	Лестничные марши Staircases	Преграда Barrier	Перекрытие Overlap	Стена Wall	Люк Hatch
бσ, мкм бσ, μm	262	1539	729	398	372	983	464	488
Ср	0,65	0,11	0,23	0,43	0,46	0,17	0,37	0,35

Очевидно, что для статистически неуправляемого процесса аналитические методы оценивания неопределенности являются неадекватными. В данном случае следует применить методы, которые компенсируют вариацию, связанную с технологическим процессом, минимизируя тем самым риск потребителя β (сноска ²).

В международной практике контроля широкое применение получил подход, получивший название метода «защитной полосы» (рисунок 4) [7, 8]; в производственной практике носит название «технологического допуска».

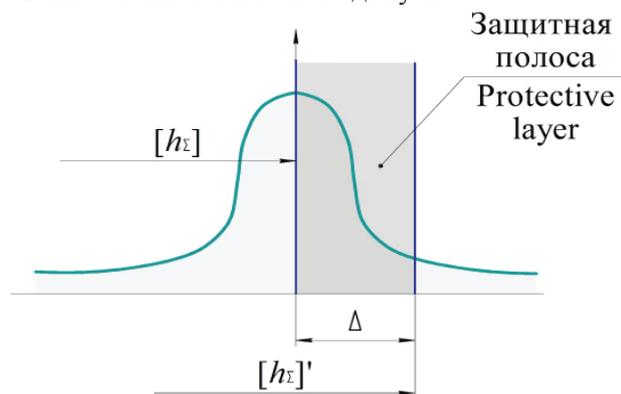


Рисунок 4 – Метод «защитной полосы» для снижения риска некорректного контроля толщины огнезащитного покрытия: $[h_{\Sigma}]$ – критическое значение толщины покрытия; h_{Σ} – суммарная толщина огнезащитного покрытия

Figure 4 – «Protective layer» method to reduce the risk of incorrect control of the flame retardant coating thickness: $[h_{\Sigma}]$ – coating thickness value; h_{Σ} – the total thickness of flame-retardant coating

Сущность метода «защитной полосы» заключается в том, что допускаемая граница контроля смещается в сторону увеличения толщины покрытия на величину поправки Δ , представляющую собой расширенную неопределенность метода измерений, рассчитанную с учетом риска потребителя β . При этом минимально допустимая толщина покрытия $[h_{\Sigma}]'$ увеличивается на Δ :

$$[h_{\Sigma}]' = [h_{\Sigma}] + \Delta, \quad (4)$$

где Δ – расширенная неопределенность метода измерений, которая должна быть оценена аккредитованной лабораторией в соответствии с требованиями СТБ ИСО/МЭК 17025⁶ с доверительной вероятностью $P = 1 - \beta$.

Следует иметь в виду, что увеличение зоны «защитной полосы» с целью снижения β , приводит к увеличению риска поставщика α . Т.е. возрастает риск того, что по результатам измерений в точке контроля будет принято решение о несоответствии толщины покрытия требованиям, в то время, как на самом деле требования к толщине покрытия выдержаны.

⁶Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий: СТБ ИСО/МЭК 17025-2007. – Введ. 01.08.2008. – Минск : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2007. – 40 с.

Риски второй группы. Минимизация рисков второй группы

Риски второй группы связаны с нерепрезентативностью выборочного контроля всей поверхности СК и СО в целом. Данная ситуация неизбежно возникает, когда отсутствуют рекомендации по выбору количества и расположения контрольных точек на объектах контроля и принятию решений о соответствии объектов контроля.

Риск R_{21} связан с нерепрезентативностью планов выборочного контроля толщины огнезащитного покрытия СК в силу того, что они

имеют большие площади, подвергаемые контролю. С целью минимизации источника риска R_{21} были исследованы различные подходы статистического приемочного контроля, среди которых наибольшего внимания заслуживают стандарты ГОСТ Р 50779.52⁷ и ГОСТ 16493⁸. Описанный в ГОСТе Р 50779.52⁷ подход устанавливает планы контроля, которые допускают наличие дефектных точек контроля в выборке. Важно, что данный подход регламентирует согласованную схему контроля между сторонами, осуществляющими контроль огнезащитных работ (рисунок 5).

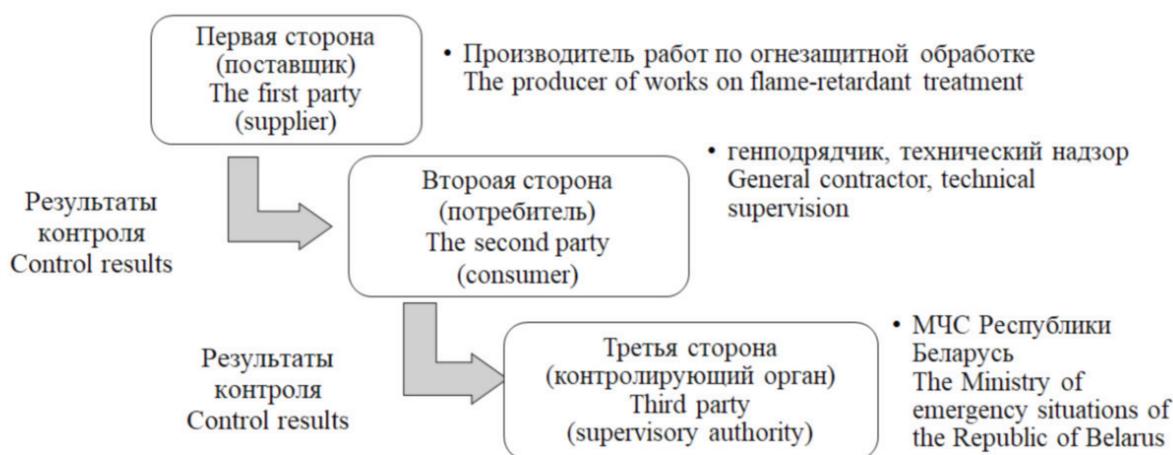


Рисунок 5 – Стороны, осуществляющие контроль огнезащитных работ
Figure 5 – The parties exercising control of flame-retardant works

Подход, описанный в ГОСТе 16493⁸, устанавливает планы контроля, не допускающие наличие дефектных точек контроля в выборке.

ТК ВУ 35 принял решение о применении подхода ГОСТа Р 50779.527 как основы для разработки методики контроля с последующей адаптацией к установившейся практике работ и требованиям МЧС Республики Беларусь.

Ключевым моментом методики контроля, разрабатываемой в соответствии с ГОСТом Р 50779.527, является тот факт, что один и тот же СО по характеристикам огнезащиты контролируют последовательно три стороны контроля (рисунок 5). При этом каждая последующая сторона контроля учитывает результаты

и статус контроля, предыдущей стороны.

Преимущество такой схемы заключается в том, что она позволяет каждой стороне контроля выбрать план контроля с учетом априорной информации о качестве огнезащитных работ. В рамках методики контроля сформулированы 6 уровней доверия ($T1-T6$), априорно определяющие состояние качества огнезащитных работ, причем как с позиции производства работ, так и с позиций их контроля предшествующей стороной (таблица 5).

В качестве примера приводятся условия присвоения уровней доверия, которые предполагают наличие необходимых документов для осуществления огнезащитных работ.

⁷Статистические методы. Приемочный контроль качества по альтернативному признаку: ГОСТ Р 50779.52-95. – Введ. 01.07.96. – М. : Издательство стандартов, 1982. – 234 с.

⁸Качество продукции. Статистический приемочный контроль по альтернативному признаку. Случай недопустимости дефектных изделий в выборке: ГОСТ 16493-70. – Введ. 01.01.72. – М. : Стандартиформ, 1972. – 34 с.

Таблица 5/Table 5

Уровни доверия, априорно определяющие состояние качества огнезащитных работ
Trust levels, a priori determining the state of quality of flame-retardant works

Уровень доверия Trust level	Условия присвоения уровня доверия Terms of assigning the level of trust
T1	<p>Наличие: лицензии МЧС Республики Беларусь на право осуществления деятельности по обеспечению пожарной безопасности в части выполнения работ с применением огнезащитных средств; копии сертификата соответствия или декларации о соответствии на огнезащитное средство; Presence: license of the Ministry of emergency situations of the Republic of Belarus to carry out activities to ensure fire safety in relation to execution of works with application of fire retardants; copies of the certificate of conformity or Declaration of conformity for a flame retardant;</p> <p>...</p> <p>Наличие: проекта производства огнезащитных работ; актов промежуточной приемки ответственных конструкций; Presence: project of production of fire-retardant works; acts of intermediate acceptance of critical structures;</p> <p>...</p>
...	...
T5–T6	<p>Положительные результаты контроля первой и второй сторонами (поставщика и потребителя). Positive results of control of the first and second parties (supplier and consumer).</p>

На основании идентифицированного уровня доверия T сторона контроля в соответствии с методикой контроля определяет характеристики плана выборочного контроля: количество контрольных точек N_k и браковочное число R_e . Очевидно, что чем выше уровень доверия, тем менее строгий план контроля при одном и том же риске потребителя β (меньше N_k и больше R_e). При формулировании содержания уровней доверия был использован опыт производственной практики строительных организаций, организаций, производящих огнезащитные работы (более 300 компаний), МЧС Республики Беларусь. Сформированный алгоритм определения плана контроля минимизирует связанные с данным фактором риски недостоверного контроля.

Риск R_{22} связан с таким аспектом выборочного контроля толщины огнезащитного покрытия СК, как расположение контрольных точек в количестве N_k на объекте контроля. С целью минимизации риска недостоверного контроля, связанного с этим аспектом, был применен метод аналогов. Проведен анализ подходов в международной практике проведения выборочного контроля толщины лакокрасочных покрытий

трубопроводов, корпусов морских судов, выборочного контроля урожайности аграрных культур на полях большой площади и др. (сноска⁴). В результате был выбран подход, суть которого состоит в том, что расположение точек контроля формируется в зависимости от площади объекта контроля и его принадлежности к определенной классификационной группе. В рамках методики контроля все типы СК могут быть отнесены к одной из групп: «поверхность», «колонна», «элемент сложной геометрической формы» (стыки, лестничные марши и др.). Для каждой группы в зависимости от размера объекта контроля предложена схема расположения точек контроля, что позволяет минимизировать связанные с данным аспектом риски недостоверного контроля.

Риск R_{23} связан с вероятностью некорректного принятия решения о соответствии СО требованиям огнестойкости, связанного с иерархичностью процедуры контроля. СО состоит из множества СК, а каждая СК контролируется в соответствии со своим планом выборочного контроля. В результате оценка соответствия СО является интегральной, принимаемой на основании множества первичных оценок соответствия.

Для минимизации данного риска нами предложены правила принятия решений о соответствии требованиям огнестойкости СО.

Заключение о соответствии единичного объекта контроля – отдельной СК – проводится в соответствии со следующим алгоритмом действий (рисунок 6).

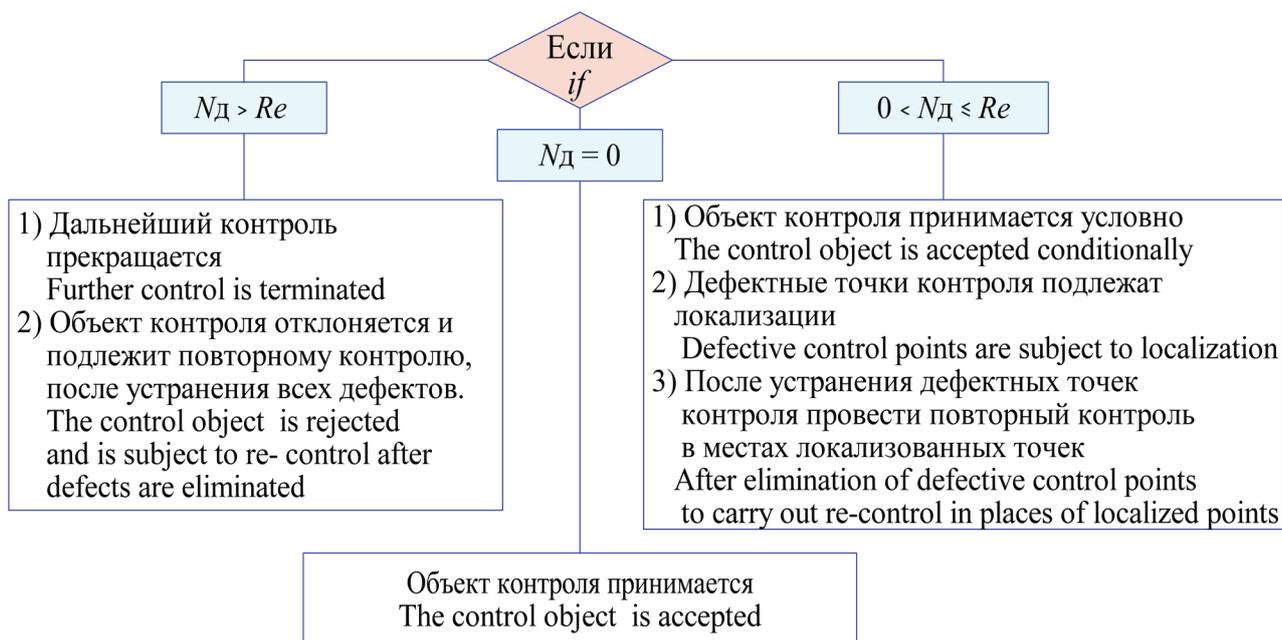


Рисунок 6 – Заключение о соответствии одного объекта контроля: N_k – количество контрольных точек; N_d – количество дефектных точек; R_e – браковочное число

Figure 6 – Conclusion about the compliance of single building construction: N_k – the number of control points; N_d – the number of defective points; R_e – rejection number

Заключение о соответствии требованиям всего СО делается на основании множества заключений о соответствии отдельных СК, входящих в состав СО. Принят следующий алгоритм принятия решения о соответствии СО в целом (рисунок 7):

– если все СК как объекты контроля приняты соответствующими по итогам контроля, то СО принимается;

– если хотя бы одна СК как объект контроля отклонена по итогам контроля, то СО не принимается.

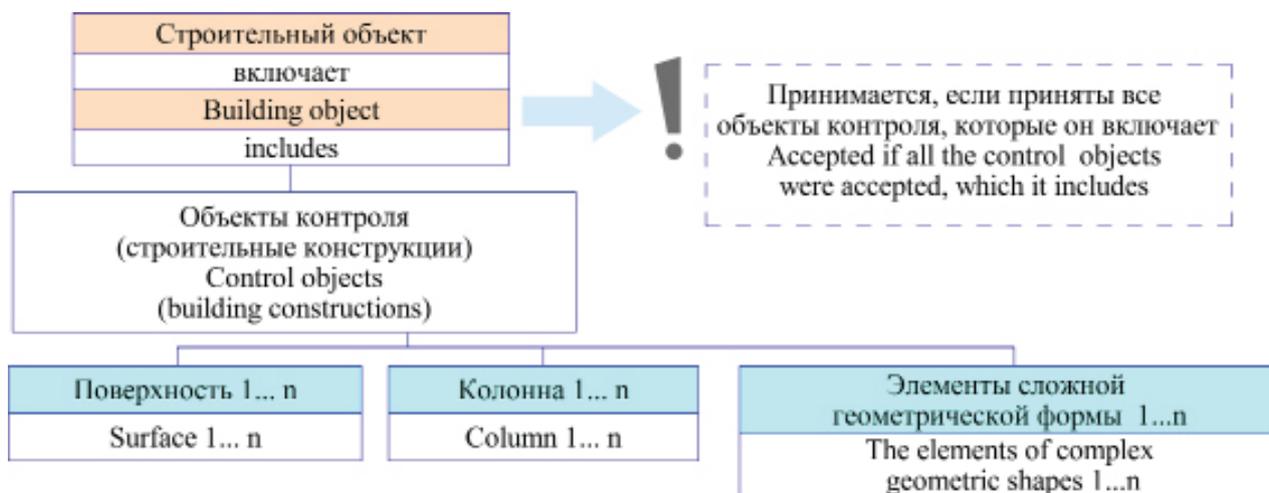


Рисунок 7 – Заключение о соответствии строительного объекта

Figure 7 – Conclusions about the compliance of building constructions

Заключение

Предложено решение задачи разработки методики контроля толщины огнезащитного покрытия строительных конструкций в условиях высокого риска принятия некорректного решения по результатам контроля. Рассмотрены теоретические и прикладные аспекты процесса контроля толщины покрытия. Сформулирована метрологическая задача измерений толщины огнезащитного покрытия как косвенное измерение неразрушающими методами толщинометрии.

Обоснован риск-ориентированный подход к разработке методики контроля, предполагающий рассмотрение на базе процессной модели контроля строительного объекта всех возможных потенциальных проблем, которые могут вызвать риск некорректного принятия решения. Разработана модель рисков, возникающих при контроле толщины огнезащитного покрытия. Идентифицированы две группы рисков. Первая группа связана с неопределенностью измерения толщины покрытия в единичной точке контроля строительной конструкции. Вторая группа рисков связана с нерепрезентативностью выборочного контроля всей поверхности строительной конструкции и строительного объекта в целом. Приведен анализ возникновения каждого потенциального источника риска, вскрыты механизмы их проявления и оценена степень влияния на результат достоверного контроля соответствия толщины огнезащитного покрытия требованиям. Для каждого источника риска контроля определены рациональные пути их минимизации в виде технических или организационно-технических мер, нашедших отражение в разрабатываемой методике контроля и обеспечивающих в комплексе объективно наименьший риск некорректного решения по результатам контроля.

Проект методики контроля построен на основе согласованной схемы контроля толщины огнезащитного покрытия строительных конструкций последовательно тремя сторонами: производителем огнезащитных работ, генеральным подрядчиком строительных работ и представителями МЧС Республики Беларусь. Проект методики контроля качества огнезащитных работ одобрен техническим комитетом по стандартизации ТК ВУ 35 и предложен для включения в структуру проекта государственного стандарта «Контроль качества огнезащитных работ. Общие технические требования. Методы проведения».

Список использованных источников

1. Outinen, J. Research on Fire Protection Methods and a Case Study «Futurum» / J. Outinen, J. Samec, Z. Sokol // *Procedia Engineering*. – Vol. 40. – 2012. – P. 334–340.
2. Gian-Luca F. Porcari. Fire induced progressive collapse of steel building constructions: A review of the mechanisms / Gian-Luca F. Porcari, Ehab Zalok, Waleed Mekky // *Engineering Constructions*. – Vol. 82. – 2015. – P. 261–267.
3. Недвига, Е.С. Способы защиты строительных конструкций от огневого воздействия / Е.С. Недвига, К.И. Соловьева, С.С. Киселев. – М. : Молодой ученый. – 2015.
4. Федоров, В.С. Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций / В.С. Федоров, В.Е. Левитский, И.С. Молчадский, А.В. Александров. – М. : АСВ, 2009. – 408 с.
5. Мосалков, И.Л. Огнестойкость строительных конструкций / И.Л. Мосалков, Г.Ф. Плюснина, А.Ю. Фролов. – М. : Спецтехника, 2001. – 496 с.
6. Ройтман, В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий / В.М. Ройтман. – М. : Ассоциация «Пожарная безопасность и наука». – 2001. – 382 с.
7. JCGM 106:2012 Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment.
8. Guide OIML G 19:2017 The role of measurement uncertainty in conformity assessment decisions in legal metrology.
9. William D. Corbett, KTA-Tator, Inc. Chair – SSPC Committee C.3.2 / SSPC-PA 2. Procedure for Determining Conformance to dry coating Thickness requirements. – 2013.

References

1. Outinen J., Samec J., Sokol Z. Research on Fire Protection Methods and a Case Study «Futurum». *Procedia Engineering*, vol. 40, 2012, pp. 334–340.
2. Gian-Luca F. Porcari, Ehab Zalok, Waleed Mekky. Fire induced progressive collapse of steel building constructions: A review of the mechanisms. *Engineering Constructions*, vol. 82, 2015, pp. 261–267.
3. Nedviga E.S., Solov'eva K.I., Kiselev S.S. *Sposoby zashchity stroitel'nykh konstrukttsii ot ogneвого vozdeistviya* [Methods of protection of building structures from the impact of fire]. Moscow, Young scientist Publ., 2015.
4. Fedorov V.S., Levitsky V.E., Molchadsky I.S., Alexandrov A.V. *Ognestoikost' i pozharnaya opasnost' stroitel'nykh konstrukttsii*. [Fire-Resistance and fire danger of building constructions]. Moscow, DIA Publ., 2009, 408 p.

5. Mosolkov I.L., Plyusnina G.F., A. Frolov A. *Ognestoikost' stroitel'nykh konstruksii*. [Fire-Resistance of building structures]. Moscow, Special Equipment Publ., 2001, 496 p.

6. Roitman V.M. *Inzhenernye resheniya po otsenke ognestoikosti proektiruemykh i rekonstruiruemykh zdanii* [Engineering solutions for fire resistance assessment of projected and reconstructed buildings]. Moscow, Association «Fire safety and science», 2001, 382 p.

7. JCGM 106:2012 Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment.

8. Guide OIML G 19:2017 The role of measurement uncertainty in conformity assessment decisions in legal metrology.

9. William D. Corbett, KTA-Tator, Inc. Chair – SSPC Committee C.3.2 / SSPC-PA 2. Procedure for Determining Conformance to dry coating Thickness requirements, 2013.

Measurement of the amplitude of periodic signals using the Fibonacci method

Petrushak V.S.

*Khmelnytsky National University,
Kamyanetska str., 112/2, Khmelnytsky 29016, Ukraine*

Received 05.02.2018

Accepted for publication 25.04.2018

Abstract

Development of new methods and high-rate means for converting the amplitude of high-frequency periodic signals into a binary code with high speed for solving problems of industrial tomography, radar, radio navigation, during measurements of amplitude-frequency characteristics, measurement of the amplitude of signal generators is relevant in scientific terms and useful in practical applications. The aim of the study was to create a new amplitude meter for high-frequency periodic signals based on the Fibonacci method without converting the AC voltage into an equivalent parameter.

Based on the developed algorithm and the equation for converting the amplitude of periodic signals into code using the Fibonacci method, a functional scheme of the amplitude converter has been developed. This made it possible to realize an 8-bit amplitude converter in code on the FPGA Cyclone V series of the Altera company.

Amplitude converter of periodic signals into the code based on the Fibonacci method consists of: two comparators, a phase detector, a short pulse shaper, a digital-to-analog converter, a Fibonacci register, an extender, a clock counter, a decoder and an indicator. In the developed meters of the amplitude of the periodic signal, the process of forming the measuring periods and their calculation was applied, this made it possible to avoid the conversion of the alternating voltage into an equivalent parameter. The process of forming measurement periods and their calculation is realized on the basis of a comparator and a counter. The application of the Fibonacci register allowed setting the conversion time at the level of N/f (number of register bits / frequency of the incoming signal). Using the Fibonacci sequence of the pentanacci sequence in the basis of the work of the Fibonacci register allowed obtaining odd code values at its output.

Based on the obtained research results, a high-resolution converter of the amplitude of high-frequency periodic signals can be developed into a binary code with high speed for tasks: industrial tomography, radar and radio navigation.

Keywords: amplitude, Fibonacci method, periodic signal, digital-to-analog conversion.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-167-172

Адрес для переписки:

*Петрушак В.С.
Хмельницкий национальный университет,
ул. Каменецкая, 112/2, г. Хмельницкий 29016, Украина
e-mail: petrushak@ukr.net*

Address for correspondence:

*Petrushak V.S.
Khmelnytsky National University,
Kamyanetska str., 112/2, Khmelnytsky 29016, Ukraine
e-mail: petrushak@ukr.net*

Для цитирования:

*Petrushak V.S.
Measurement of the amplitude of periodic signals using the Fibonacci method.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 2. – С. 167–172.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-167-172*

For citation:

*Petrushak V.S.
Measurement of the amplitude of periodic signals using the Fibonacci method.
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 2, pp. 167–172.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-167-172*

Измерение амплитуды периодических сигналов с использованием метода Фибоначчи

Петрушак В.С.

Хмельницкий национальный университет,
ул. Каменецкая, 112/2, г. Хмельницкий 29016, Украина

Поступила 05.02.2018

Принята к печати 25.04.2018

Разработка новых методов и высокоразрядных средств преобразования амплитуды высокочастотных периодических сигналов в двоичный код с высоким быстродействием для решения задач промышленной томографии, радиолокации, радионавигации, во время измерений амплитудно-частотных характеристик, измерений амплитуды генераторов сигналов является актуальным в научном отношении и полезным в практическом применении. Целью данной работы было создание нового измерителя амплитуды высокочастотных периодических сигналов на основе метода Фибоначчи без преобразования переменного напряжения в эквивалентный параметр.

На основе разработанного алгоритма и уравнения преобразования амплитуды периодических сигналов в код с использованием метода Фибоначчи разработана функциональная схема преобразователя амплитуды. Это позволило реализовать 8-разрядный преобразователь амплитуды в код на программируемой логической интегральной схеме серии *Cyclone V* фирмы *Altera*.

Преобразователь амплитуды периодических сигналов в код на основе метода Фибоначчи состоит из: двух компараторов, фазового детектора, формирователя коротких импульсов, цифро-аналогового преобразователя, регистра Фибоначчи, экстрематора, счетчика тактовых импульсов, дешифратора и индикатора. В разработанном измерителе амплитуды периодического сигнала были применены процесс формирования измерительных периодов и их подсчет, что позволило избежать преобразования переменного напряжения в эквивалентный параметр. Процесс формирования измерительных периодов и их подсчет реализованы на основе компаратора и счетчика. Применение регистра Фибоначчи позволило установить время преобразования на уровне N/f (количество разрядов регистра/частота входящего сигнала). Использование в основе работы регистра Фибоначчи последовательности пентанаиччи позволило получить нечетные значения кода на его выходе.

На основе полученных результатов исследований может быть разработан высокоразрядный преобразователь амплитуды высокочастотных периодических сигналов в двоичный код с высоким быстродействием для задач промышленной томографии, радиолокации и радионавигации.

Ключевые слова: амплитуда, метод Фибоначчи, периодический сигнал, цифро-аналоговое преобразование.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-167-172

Адрес для переписки:
Петрушак В.С.
Хмельницкий национальный университет,
ул. Каменецкая, 112/2, г. Хмельницкий 29016, Украина
e-mail: petrushak@ukr.net

Address for correspondence:
Petrushak V.S.
Khmelnytsky National University,
Kamyanetska str., 112/2, Khmelnytsky 29016, Ukraine
e-mail: petrushak@ukr.net

Для цитирования:
Petrushak V.S.
Measurement of the amplitude of periodic signals using the Fibonacci method.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 2. – С. 167–172.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-167-172

For citation:
Petrushak V.S.
Measurement of the amplitude of periodic signals using the Fibonacci method.
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 2, pp. 167–172.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-167-172

Introduction

The theoretical basis for problems of industrial tomography [1] requires a process of measuring the amplitude of high frequency periodic signals, but not its mean root mean square or median-directed value. Since the amplitude of the reflected signal depends on the current image of the spatial distribution of physical quantities. Tracking changes in size is an urgent task for many industries. In atomic energy it can be controlled by a chain reaction in an atomic reactor. In the chemical industry, it can be controlled by the chain reaction of cracking, combustion, polymerization and other reactions. In heat power engineering it can be a control of the process of cavitation in the heat generator. This will allow for the objective control of technological processes in industrial facilities, providing technical, economic or environmental efficiency. In the radio geodesy, the area of the object of observation depends on the amplitude of the reflected signal to estimate the volume of minerals.

At the same time, the analysis of scientific and technical literature and patent search showed [2–6] that today these problems are solved by converting the alternating voltage into an equivalent constant voltage or thermal energy parameter. The use of converters based on the amplitude detector [2] results in a reduction in sensitivity, the occurrence of a conversion error, which respectively results in distortion of measurement results. In this case, the measuring channel needs to stabilize the characteristics of the transformation into the targeted efforts of scientists.

Existing means [7], which directly measure the amplitude of periodic signals, convert it into binary code and operate only at low frequencies (sigma-delta analog-to-digital converter) or have a low bit (parallel ADC) and not synchronized with the input signal. This in the first case makes it impossible to use them for research data, and in the second one, it increases the error and time of the processing of the measurement results and, accordingly, reduces the sensitivity of the receiver.

The aim of the study was to create a new amplitude meter for high-frequency periodic signals based on the Fibonacci method without converting the AC voltage into an equivalent parameter.

Main part

The essence of the developed method consists in the consistent approximation of the value of the

comparative voltage to the level of the amplitude of the input periodic signal. According to the scheme presented in Figure 1, the measurement begins with the process of comparing the amplitude value of the voltage of the input periodic signal U with the value of the comparative voltage U_c , and can be determined by the equation [8]:

$$U_{k1} = U - U_c. \quad (1)$$

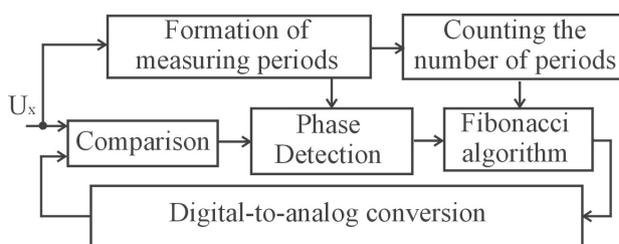


Figure 1 – Scheme of the process of measuring the amplitude of the periodic signal by Fibonacci method

Simultaneously with the comparison process, the allocation of a positive half-wave of a periodic signal occurs, that is, the formation of measuring periods. The mathematical model of such a process can be described by the expression [8]:

$$U_{k2} = (U - |U_-|)k, \quad (2)$$

where U_- – amplitude of the negative half-wave of the periodic signal; k – gain.

A mathematical model describing the process of phase detection can be set by a system of equations [9]:

$$\begin{cases} \varphi = 0, & \text{if } U \leq U_c; \\ \varphi > 0, & \text{if } U > U_c. \end{cases} \quad (3)$$

where φ – phase shift, whose value can be obtained from the expression $\varphi = 2\pi\tau_x/T$ (τ_x – time shift between the signal of the process of forming the measuring periods (U_{k2}) and the signal of the comparison process (U_{k1}), T – input signal period).

The process of the number of periods of the investigated signal can be conventionally described by the equation [10]:

$$C = 2^k,$$

where k – number of digits required to count the number of periods.

The Fibonacci sequence is defined as a series of numbers, in which each subsequent number is equal to the sum of the two previous [11]:

1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 377, 610...

The Fibonacci sequence can be conventionally described by a recurrence relation:

$$a_{n+1} = a_n + a_{n-1},$$

where $a_1 = 1, a_2 = 1$.

In theory there are tribonacci sequences, which are defined as a series of numbers, in which each subsequent number is equal to the sum of the three previous ones. Accordingly, a quaternacci and pentanacci sequence can be formed, which is defined as a series of numbers, in which each subsequent number is equal to the sum of the previous five, and this sequence of numbers can be described by the recurrence relation:

$$a_{n+1} = a_n + a_{n-1} + a_{n-2} + a_{n-3} + a_{n-4}. \quad (4)$$

The process of converting a digital code to the corresponding value of a constant voltage is characterized by a change in the value of the comparative voltage U_c by the value:

$$U_c = \frac{a_n U_0}{2^n}, \quad (5)$$

where a_n – the value of the Fibonacci number binary code; U_0 – the reference voltage required for the digital code conversion process.

Combining expressions (1)–(5) we obtain a mathematical model that describes the process of converting the amplitude of a periodic signal into a code by the Fibonacci method:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{k1} = U_m - U_c; \\ U_{k2} = (U_m - |U_-|) \cdot k; \\ \left\{ \begin{array}{l} \varphi = 0, \text{ if } U \leq U_c; \\ \varphi > 0, \text{ if } U > U_c; \end{array} \right. \\ a_{n+1} = a_n + a_{n-1} + a_{n-2} + a_{n-3} + a_{n-4}; \\ U_c = \frac{a_n \cdot U_0}{2^n}. \end{array} \right. \quad (6)$$

In accordance with the mathematical model (6), for the Fibonacci method, the transformation equation can be written as:

$$U_m = \left(\frac{a_{n-i} \pm \dots \pm a_n}{2^n} \right) \cdot U_0, i = \overline{k..1}. \quad (7)$$

In accordance with the mathematical model (6) and transformation equation (7), an algorithm for the process of converting the amplitude of the periodic signal into the code by the Fibonacci method is presented in Figure 2.

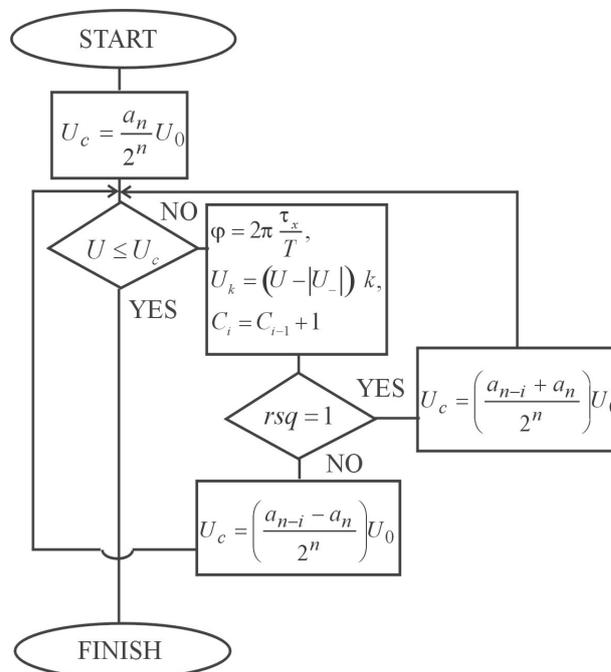


Figure 2 – Algorithm of the process of transforming the amplitude of periodic signals method of successive approximation

This algorithm displays a sequence of stages of the process of converting the amplitude of a periodic signal into a digital code, and also involves checking the condition of matching the values of the voltage of the investigated signal and the comparative voltage and checking the condition of equality of the digital equivalent of the phase shift to the value of the logical «1» or «0». Checking the first condition indicates the cyclicity of the measurement process until the moment of setting the amplitude value of the input periodic signal. Checking the second condition determines the positive or negative effect of the conversion process.

According to the mathematical model and algorithm, a functional diagram of the transformation process is developed (Figure 3) and represented by oscillograms (Figure 4), which confirm the efficiency of the developed method and obtained in the Quartus.

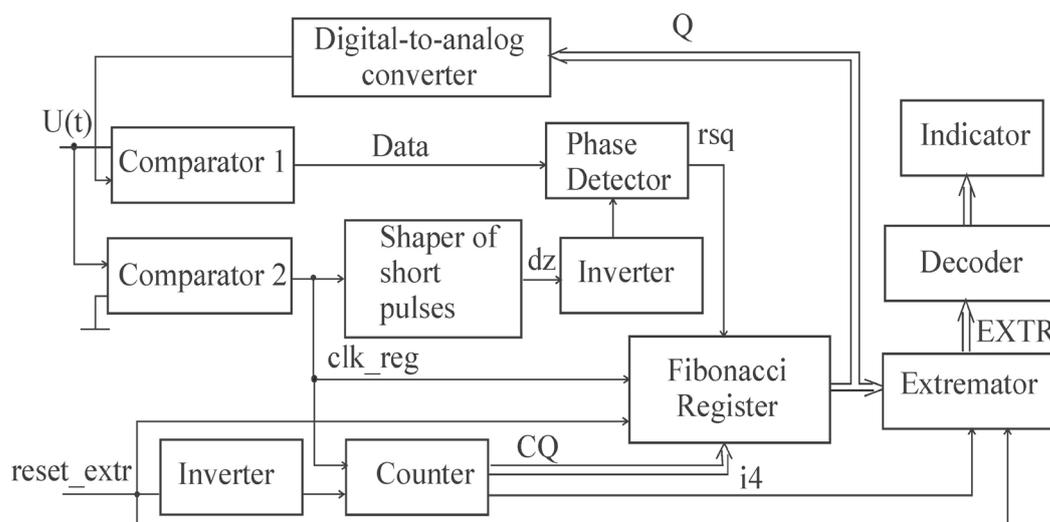


Figure 3 – Functional diagram of the converter of the amplitude of the periodic signal by Fibonacci method

The principle of the scheme is as follows.

The comparator 2 generates a sequence of rectangular pulses from the input periodic signal, which are simultaneously pulses of synchronization for the Fibonacci register, counter pulses for the counter, and a reset signal for the phase detector. The binary output code of the counter arrives at the entry of the Register data and indicates the number of the measurement period. In the case where the level of the input periodic signal applied to the positive input of the comparator 1 exceeds the value of the constant voltage applied to its negative input, a rectangular pulse will be generated at the output of the comparator. The front edge of a rectangular

pulse indicates the initial moment to form a phase interval. The end point of the phase interval is given by the front edge of the reset signal. Thus, the phase detector forms a phase interval, the presence of which during a single period of the synchronization signal sets the positive cycle of the Fibonacci register. Accordingly, the absence of a phase interval indicates a negative cycle. The binary code generated in the register sets the value of the DC voltage at the output of the digital-to-analog converter. Upon termination of the iterative process, the Fibonacci register value of the comparative constant voltage will correspond to the value of the amplitude of the input periodic signal and the measurement process will end.

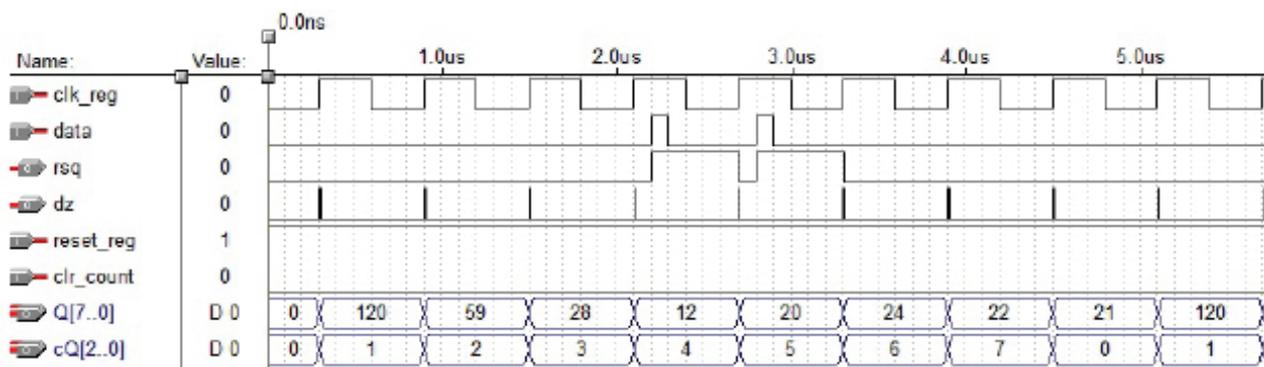


Figure 4 – Oscillograms of signals that explain the principle of the operation of the scheme

The digital part of the amplitude converter to the code by the Fibonacci method is implemented on the FPGA Cyclone V series. The Fibonacci register is implemented on the basis of

the pentanacci sequence (4), which allowed to get odd values of the code at its output. The maximum frequency of the input signal for this converter is 100 MHz.

Conclusion

The Fibonacci method for analog-to-digital conversion of the amplitude of a periodic high-frequency signal is further developed, which, unlike existing ones, consists in finding the amplitude value by increasing or decreasing the level of comparative voltage with each period of comparison, the number of which is determined by the register, which makes it possible to avoid the transformation alternating voltage to the equivalent parameter and set the conversion time and at the level N/f (number of register digits / input frequency).

The algorithm was developed and the equation for converting the amplitude of periodic signals into the code using the Fibonacci method was used, on the basis of which a functional diagram of the amplitude converter was developed. This allowed the implementation of a 8-bit amplitude converter in code on the FPGA Cyclone V series of the Altera company.

The obtained research results can be used for the development of high-frequency means of converting the amplitude of high frequency periodic signals into binary code with high speed: in industrial tomography, radar and radio navigation for the monitoring of fast-moving processes with a duration of more than 10^{-6} s.

References

1. Wang M. Industrial Tomography, Systems and Applications. Elsevier, 2015, 744 p.
2. Polischuk E.C., Dorogovets M.M., Yatsuk V.O. *Metrologiya ta vimiruvalna tekhnika* [Metrology and measuring technique]. Lviv, Beskid Bit Publ.,

2003, 544 p. (in Ukrainian).

3. Dvoryashin B.V. *Metrologiya i radioizmereniya* [Metrology and radio measurements]. Moscow, Akademiya Publ., 2005, 304 p. (in Russian).

4. Martin U. Reissland. *Electrical Measurements: Fundamentals, Concepts, Applications*. Reprinted edition. New Delhi New Age International Publishers, 2008, 340 p.

5. Doronina G.M., Lavrov V.M. *Opisaniye k patentu na izobreteniyе. G 01 R 19/04. Ustroystvo dlya opredeleniya ekstrumov elektricheskikh signalov* [Device for determining the extremes of electrical signals]; Patent UA no. 9849C1, 30.09.1999.

6. US2009/0082981 A1. Method and apparatus for measurement of amplitude of periodic signal and method and apparatus for test of magnetic head / Akifumi Muto, Kawasaki(JP). Pub. Date: Mar.26, 2009.

7. Gelman M.M. *Analog to digital converter for the informatively-measuring systems*. Publishing house of standards, 2009, 317 p.

8. Petrushak V.S., Petrushak O.M. [Simulation of the direct quantization method by level for measuring the amplitude of sinusoidal signals]. *Visnik Hmelnytskogo natsionalnogo universitetu* [Herald of Khmelnytskyi national university], 2005, vol. 2, no. 6 (in Ukrainian).

9. Trocishin I.V., Petrushak V.S., Petrushak O.M. [Development and research of the direct quantization method by level for measuring the amplitude of electrical signals]. *Vimiryuvalna tekhnika ta metrologiya* [Measuring equipment and metrology], 2006, no. 68 (in Ukrainian).

10. Opadchiy Y.F., Gludkin O.P., Gurov A.I. *Analogovaya i tsifrovaya elektronika* [Analog and digital electronics]. Moscow, Goryachaya Liniya-Telecom Publ., 2000, 768 p. (in Russian).

11. Sigler L.E. *Fibonacci's Liber Abaci: Leonardo Pisano's Book of Calculations*. New York, Springer, 2002, 638 p.

УДК 621.396.67

Применение статистических методов для оценки метрологических характеристик радиоголографических измерительных комплексов

Гринчук А.П., Будай А.Г., Громыко А.В.

Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко
Белорусского государственного университета,
ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Беларусь

Поступила 25.01.2018

Принята к печати 11.04.2018

Практическое применение радиоголографического метода измерения характеристик антенн, в особенности при проведении приемочных испытаний систем, требует адекватной оценки погрешностей восстановления дальнезонных характеристик. Указанные погрешности являются суперпозицией слагаемых от различных источников, имеющих различную природу, различные временные характеристики и различные степени влияния на конечный результат. Целью данной работы являлась разработка практической методики определения влияния случайных погрешностей измерения амплитудно-фазового распределения поля исследуемой антенны на точность восстановления дальнезонных характеристик (в первую очередь диаграммы направленности) антенны, причем предлагаемая методика основана только на обработке экспериментальных результатов, полученных на данном измерительном комплексе.

Разработана и экспериментально подтверждена практическая методика определения влияния случайных погрешностей измерения амплитудно-фазового распределения поля исследуемой антенны на точность восстановления ее дальнезонных характеристик (в первую очередь диаграммы направленности) на основе корреляционного и спектрального анализа. Основным преимуществом разработанной методики по сравнению с использованием математического моделирования является то, что оценка точности восстановления диаграмм направленности проводится по результатам обработки экспериментальных данных, полученных на конкретном измерительном комплексе, и не накладывает априори никаких предварительных требований на статистические параметры погрешностей. Разработанная процедура оценки влияния случайных погрешностей может использоваться для разработки методики метрологической аттестации измерительных комплексов как средств измерения.

Ключевые слова: диаграмма направленности, ближняя зона, погрешности измерения, корреляционный анализ, измерительный комплекс.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-173-181

Адрес для переписки:

Гринчук А.П.
Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко
Белорусского государственного университета,
ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Беларусь
e-mail: anatbudai@gmail.com

Address for correspondence:

Grinchuk A.
A.N. Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems,
Belarusian State University,
Kurchatov str., 7, Minsk 220045, Belarus
e-mail: anatbudai@gmail.com

Для цитирования:

Гринчук А.П., Будай А.Г., Громыко А.В.
Применение статистических методов для оценки метрологических характеристик радиоголографических измерительных комплексов. Приборы и методы измерений. 2018. – Т. 9, № 2. – С. 173–181.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-173-181

For citation:

Grinchuk A., Buday A., Gromyko A.
[Application of statistical methods to assess the metrological characteristics of radio-holographic measuring complexes].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 2, pp. 173–181 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-173-181

Application of statistical methods to assess the metrological characteristics of radio-holographic measuring complexes

Grinchuk A., Buday A., Gromyko A.

*A.N. Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems,
Belarusian State University,
Kurchatov str., 7, Minsk 220045, Belarus*

Received 25.01.2018

Accepted for publication 11.04.2018

Abstract

Practical application of the radio-holographic method for measuring the characteristics of antennas, especially when conducting acceptance testing of systems, requires an adequate assessment of the errors in the recovery of long-range characteristics. These errors appear to be a superposition composed of various sources, having different nature, different time characteristics and different degrees of influence on the final result. The purpose of this work was the development of a practical technique for determining the influence of random errors in measuring the amplitude-phase distribution of the field of the antenna required for the accuracy of restoring long-range characteristics (primarily the antenna pattern) of the antenna, the proposed technique being based only on processing the experimental results obtained with this measuring complex.

A practical method for determining the influence of random errors in measuring the amplitude-phase distribution of the field of the antenna under study on the accuracy of restoring its long-range characteristics (primarily the directional pattern) on the basis of correlation and spectral analysis has been developed and experimentally confirmed. The main advantage of the developed method in comparison with the use of mathematical modeling is that the estimation of the accuracy of the reconstruction of the directivity diagrams is based on the results of processing experimental data obtained on a specific measuring complex and does not a priori impose any preliminary requirements on the statistical parameters of errors. The developed procedure for estimating the influence of random errors can be used to develop a methodology for metrological certification of measuring systems as measuring instruments.

Keywords: directional pattern, near zone, measurement errors, correlation analysis, measuring complex.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-173-181

Адрес для переписки:

Гринчук А.П.
Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко
Белорусского государственного университета,
ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Беларусь
e-mail: anatbudai@gmail.com

Address for correspondence:

Grinchuk A.
A.N. Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems,
Belarusian State University,
Kurchatov str., 7, Minsk 220045, Belarus
e-mail: anatbudai@gmail.com

Для цитирования:

Гринчук А.П., Будай А.Г., Громько А.В.
Применение статистических методов для оценки метрологических характеристик радиолографических измерительных комплексов.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 2. – С. 173–181.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-173-181

For citation:

Grinchuk A., Buday A., Gromyko A.
[Application of statistical methods to assess the metrological characteristics of radio-holographic measuring complexes].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 2, pp. 173–181 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-173-181

Введение

В последнее время в связи с новыми разработками в области крупногабаритных фазированных антенных решеток все более востребованным становится радиологический метод измерения характеристик антенных систем в силу своей универсальности и информативности [1–4]. Одним из серьезных факторов, сдерживающих его распространение, наряду с достаточно высокой стоимостью программно-аппаратных измерительных комплексов, является отсутствие на настоящий момент серьезного метрологического обеспечения таких измерений, позволяющего оценить погрешности восстановления характеристик антенн. Предлагаемые в большинстве публикаций оценки адекватности ближнезонных измерений путем сравнения с результатами прямых измерений в дальней зоне [4–6] или результатами компьютерного моделирования с помощью специализированных пакетов программ [7] не могут рассматриваться как достаточно достоверные по целому ряду причин.

Анализ погрешностей измерения амплитудно-фазового распределения (АФР) поля излучения исследуемой антенны показывает, что источников погрешностей несколько, механизмы их возникновения имеют различную природу, различные временные характеристики и различные степени влияния на конечный результат.

Априори будем считать, что каждая составляющая погрешностей имеет систематическую и случайную компоненты. Выявление систематических погрешностей, определение их влияния на погрешности измерения АФР поля измеряемой антенны и точность восстанавливаемых дальнезонных характеристик является предметом отдельного исследования. В данной работе рассматривается влияние случайных компонентов погрешностей. Эти составляющие погрешностей являются преобладающими при проведении сравнительных измерений характеристик антенных систем, для которых основную роль играют постоянство и повторяемость результатов во времени.

Целью данной работы явилась разработка практической методики определения влияния случайных погрешностей измерения АФР поля исследуемой антенны на точность восстановления дальнезонных характеристик, в первую очередь диаграммы направленности (ДН) антенны, причем предлагаемая методика основана только

на обработке экспериментальных результатов, полученных на данном измерительном комплексе.

Методика

В качестве методологической основы предлагаемой методики используются подходы статистической теории антенн [8]. Представим АФР поля, измеренного на некоторой поверхности в ближней зоне антенны, в виде:

$$U = U_0 + \Delta U, \quad (1)$$

где U – измеренное АФР поля; U_0 – истинное АФР поля; ΔU – случайные погрешности измерения АФР поля.

Тогда восстановленная диаграмма направленности F описывается выражением:

$$F = F_0 + \Delta F, \quad (2)$$

где F_0 – истинная ДН; ΔF – погрешности восстановления ДН.

Используя свойство аддитивности интегральных преобразований из ближней зоны в дальнюю, будем считать, что ΔF (2) есть интегральное преобразование ΔU (1), которое представляет собой угловое распределение ошибок восстановления ДН исследуемой антенны.

Рассмотрим возможности оценки метрологических характеристик радиологических измерительных комплексов по результатам корреляционного и спектрального анализов экспериментально полученных величин ΔU .

Влияние случайных погрешностей измерительно-регистрирующей аппаратуры

В режиме неподвижного зонда регистрируем массив данных (амплитуда A и фаза Φ или квадратурные компоненты поля $A \sin \Phi$ и $A \cos \Phi$) размером $N \times M$ (N и M – число отсчетов по каждой из координат). При этом объем массива и темп измерений выбираются соответствующими реальным измерениям. Далее рассчитываются средние значения и среднеквадратичное отклонение (СКО) измеренных величин, коэффициенты и радиусы автокорреляции, а также коэффициенты их взаимосвязи¹.

¹ГОСТ Р 8.736-2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.

Указанная процедура проводится в нескольких точках динамического диапазона исследуемого комплекса. Полученные результаты позволят определить реальный динамический диапазон измерительной аппаратуры, а корреляционный анализ – наличие или отсутствие дрейфовых компонент погрешностей.

Для определения погрешностей восстановления ДН формируем массив средних значений $V_{\text{ср}} W_{\text{ср}}$ размером $N \times M$ и в соответствии с выбранными интегральными преобразованиями рассчитываем поле в дальней зоне от сформированного массива (считая его истинной ДН F_0) и от реально измеренного массива (считая его ДН с погрешностями F). Проведя вычитание $F_0 - F$, получим пространственное распределение и относительную величину погрешностей восстановления ΔF (2). При желании, комбинируя массивы средних значений и отклонений от среднего для компонент V и W , возможно отдельно проанализировать влияние, например, амплитудных и фазовых погрешностей.

Комплексный анализ влияния случайных погрешностей

Проведение полного статистического анализа характеристик измерительного комплекса в целом, т.е. с учетом погрешностей сканирующего устройства, является весьма трудоемкой задачей, так как требует регистрации и обработки значительного числа двумерных массивов. Для практики предлагается провести анализ результатов, полученных при измерениях P раз одного сечения АФР (например, одной строки и одного столбца для измерений по плоскости) в средней части АФР исследуемой антенны. В результате получаем массивы данных размером $N \times P$ и $M \times P$, т.е. P реализаций одномерных массивов размерностью N и M . Статистическая и корреляционная обработка проводится в соответствии с алгоритмом, приведенном выше, но параметры определяются не по всему массиву, а лишь по P реализациям каждого отсчета.

Финальной процедурой оценки погрешности восстановления ДН антенн с использованием данного конкретного радиолокационного комплекса является определение границ разброса восстанавливаемых ДН. Для этого рассчитывается P одномерных реализаций ДН, и для каждого отсчета (углового значения ДН) выбираются средние значения, формирующие среднюю

(истинную) ДН, а также максимальные и минимальные значения. По результатам таких измерений строятся кривые, определяющие границы разброса восстанавливаемых ДН для нескольких типов наиболее часто встречаемых АФР полей – синфазных равноамплитудных, со спадающим амплитудным распределением, формирующих разностный канал для моноимпульсных режимов и др.

Практическая реализация методики

Результаты практической реализации предлагаемой методики представим на примере исследовательского радиолокационного аппаратно-программного комплекса для измерения характеристик антенн, функционирующего в лаборатории прикладной электродинамики НИИ ПФП БГУ. Измерительный комплекс реализует планарные измерения АФР полей излучения антенн в X диапазоне длин волн. Комплекс включает сканирующее устройство, обеспечивающее сканирование по площади до 128×128 отсчетов и волноводный квадратурный измерительный приемник. Все измерения проводились в установленном режиме, который наступает через 1 ч после включения СВЧ генератора и измерительной аппаратуры, что установлено экспериментально.

Некоторые результаты статистического и корреляционного анализа реально измеренных массивов данных приведены в таблице, на рисунке 1, а спектрального анализа – на рисунке 2.

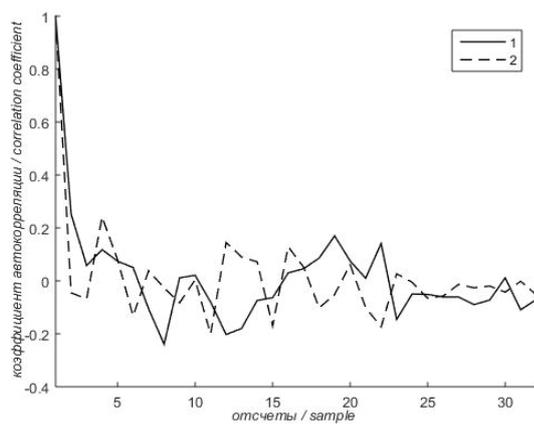
Таблица/Table

Результаты статистического и корреляционного анализа измеренных данных

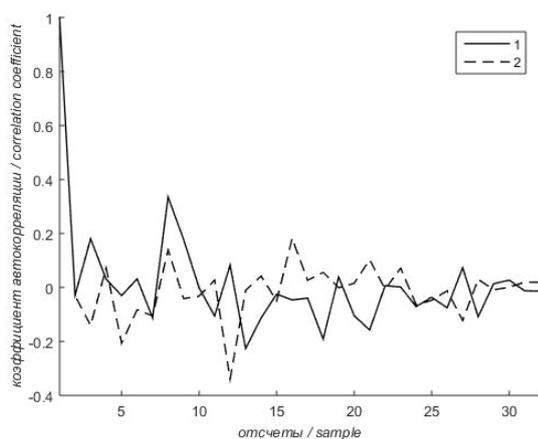
Results of statistical and correlation analysis of measured data

№	A(дБ) A(dB)	СКОА ₁ normalized standard deviation	СКОА ₂ norma- lized standard deviation	Радиусы корреляции Correlation radius			
				По строкам row		По столб- цам column	
				ρA_1	ρA_2	ρA_1	ρA_2
1	– 8,5	0,0099	0,003	0,22	0,29	0,21	0,21
2	– 14,3	0,0464	0,002	0,11	0,21	0,23	0,14
3	– 25,2	0,0088	0,018	0,24	0,14	0,18	0,15
4	– 39,5	0,0280	0,078	0,22	0,11	0,13	0,12
5	– 45,0	0,0680	0,108	0,12	0,11	0,11	0,11

В таблице приведены результаты анализа в пяти точках динамического диапазона по амплитуде: A – среднее значение амплитуды сигнала, A_1 и A_2 – среднее значение амплитуды соответствующей квадратуры. Значения амплитуды A в децибелах получены при нормировании величины A к максимальному значению 4095. Относительные значения среднеквадратичного отклонения получены путем нормирования рассчитанного СКО к величине средней амплитуды данной квадратуры и удобны для сравнения. Указанные величины совместно с видом коэффициентов автокорреляции (рисунок 1) и значениями радиусов корреляции говорят о том, что погрешности носят случайный характер и дрейфовая составляющая отсутствует.



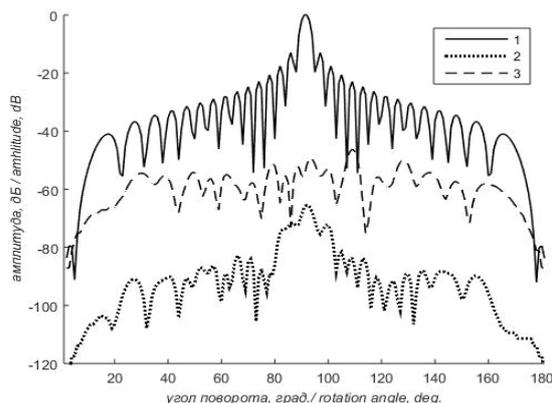
a



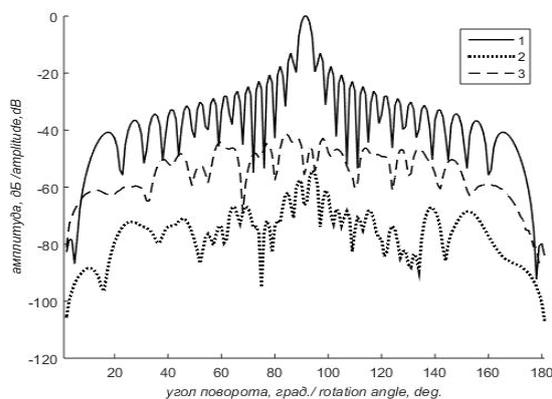
b

Рисунок 1 – Коэффициенты автокорреляции для первой (1) и второй (2) квадратур по строкам (*a*) и столбцам (*b*)

Figure 1 – The autocorrelation coefficients for the first (1) and second (2) quadratures in rows (*a*) and columns (*b*)



a



b

Рисунок 2 – Оценка влияния случайных аппаратных погрешностей на восстанавливаемую диаграмму направленности: 1 – сечение диаграммы направленности с погрешностями; 2, 3 – разности диаграмм направленности; *a* – по строке, *b* – по столбцу

Figure 2 – Evaluation of the effect of random hardware errors on the reconstructed directional pattern. 1 – cross-section of the directional pattern with errors; 2, 3 – the difference in the directional patterns; *a* – on a line; *b* – on a column

Коэффициенты взаимной корреляции подтверждают высокую степень взаимосвязи двух квадратур (коэффициенты взаимосвязи достигают значений 0,80–0,86), поскольку измерительный канал обеих квадратур один и тот же, а измерения разнесены во времени.

На рисунке 2 представлены главные сечения ДН по строке и столбцу, рассчитанных от измеренного массива данных с погрешностями размером 32×32 отсчета. В приведенном масштабе диаграммы от реально измеренного массива и массива средних значений практически совпадают. Кривые 2, 3 – разности диаграмм, причем кривая 2 относится к варианту, когда взят массив с высокой амплитудой (массив № 1 таблицы 1), а кривая 3 – к массиву № 5 таблицы 1 соответственно. Каждая разность ДН нормирована к максимуму своей рассчитанной ДН. Очевидно, что разности

диаграмм, определенные выше как спектры случайных погрешностей измерения АФР полей, образуют почти постоянный фон, имеющий слабую зависимость от угла поворота (наблюдения).

Из полученных результатов следует, что случайные погрешности измерительной аппаратуры в установившемся режиме вносят малые погрешности в восстанавливаемые ДН. Для рассматриваемого комплекса все указанные погрешности лежат ниже уровня – 45 дБ для самого неблагоприятного случая. Учитывая слабую угловую зависимость этих погрешностей, можно считать, что их значения определяют реальный динамический диапазон восстанавливаемых ДН. Сравнение кривых 2 и 3 позволяет определять (выбирать) реальные значения амплитуды измеряемого сигнала, позволяющего минимизировать значения погрешностей восстановления ДН. Как показывает практика, с учетом возможных флуктуаций это значение амплитуды измеряемого сигнала необходимо выбирать на 3–5 дБ ниже абсолютного максимума для измерительного канала.

Анализ влияния случайных погрешностей измерительного комплекса в целом (измерительно-регистрирующей аппаратуры и сканирующего устройства) проводился с использованием нескольких типов антенн: линейки печатных вибраторных излучателей (16 излучателей через $\lambda/2$), формирующих практически синфазное равноамплитудное поле, щелевой антенной решетки, работающей в моноимпульсном режиме, и др. Для каждого типа антенн проводились измерения массивов по строкам и столбцам размерностью $P \times N$ и $P \times M$, где N и M – количество отсчетов по строкам и столбцам соответственно; P – количество измерений одной строки или одного столбца. Величины N , M варьировались от 32 до 128 отсчетов, а P – от 16 до 64.

Ниже приведены некоторые примеры полученных результатов.

На рисунке 3 приведен вид среднего значения одной из квадратур АФР поля линейки печатных вибраторных излучателей и нормированного СКО этой квадратуры, а на рисунке 4 – вид коэффициентов автокорреляции двух квадратур, радиусы корреляции которых составляют 0,20 и 0,21 соответственно. Результаты получены при обработке массивов из 16 измерений строк, содержащих 32 отсчета АФР поля. Амплитуда квадратуры нормирована к максимальному значению 4095. Уровень излучаемой мощности и коэффициент передачи измерительного канала выбраны близко

к оптимальному. Аналогичные результаты получены и для других типов антенн и видов АФР полей.

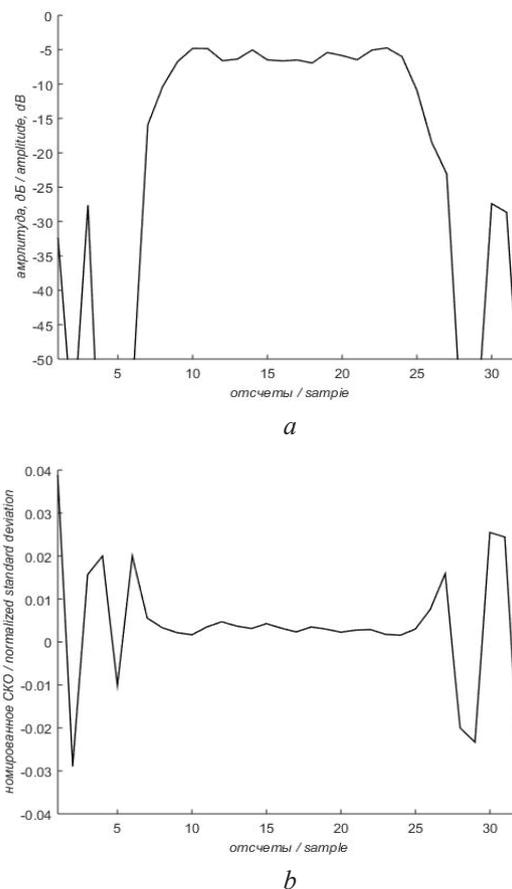


Рисунок 3 – Вид среднего значения одной из квадратур амплитудно-фазового распределения поля линейки печатных вибраторных излучателей (а) и нормированного среднеквадратичного отклонения этой квадратуры (б)

Figure 3 – Type of the mean value of one of the quadratures of the amplitude-phase distribution of the field of the line of printed vibrator emitters (a) and the standard mean-square deviation of this quadrature (b)

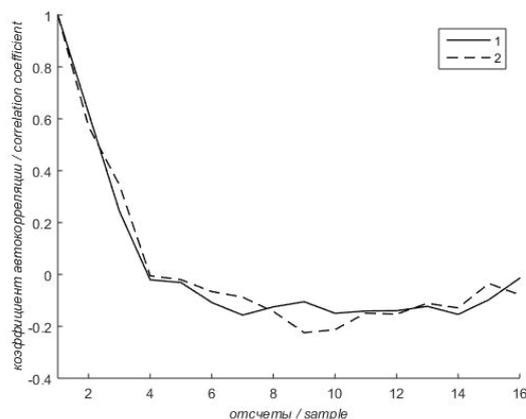


Рисунок 4 – Коэффициенты автокорреляции для первой (1) и второй (2) квадратуры

Figure 4 – Autocorrelation coefficients for the first (1) and second (2) quadratures

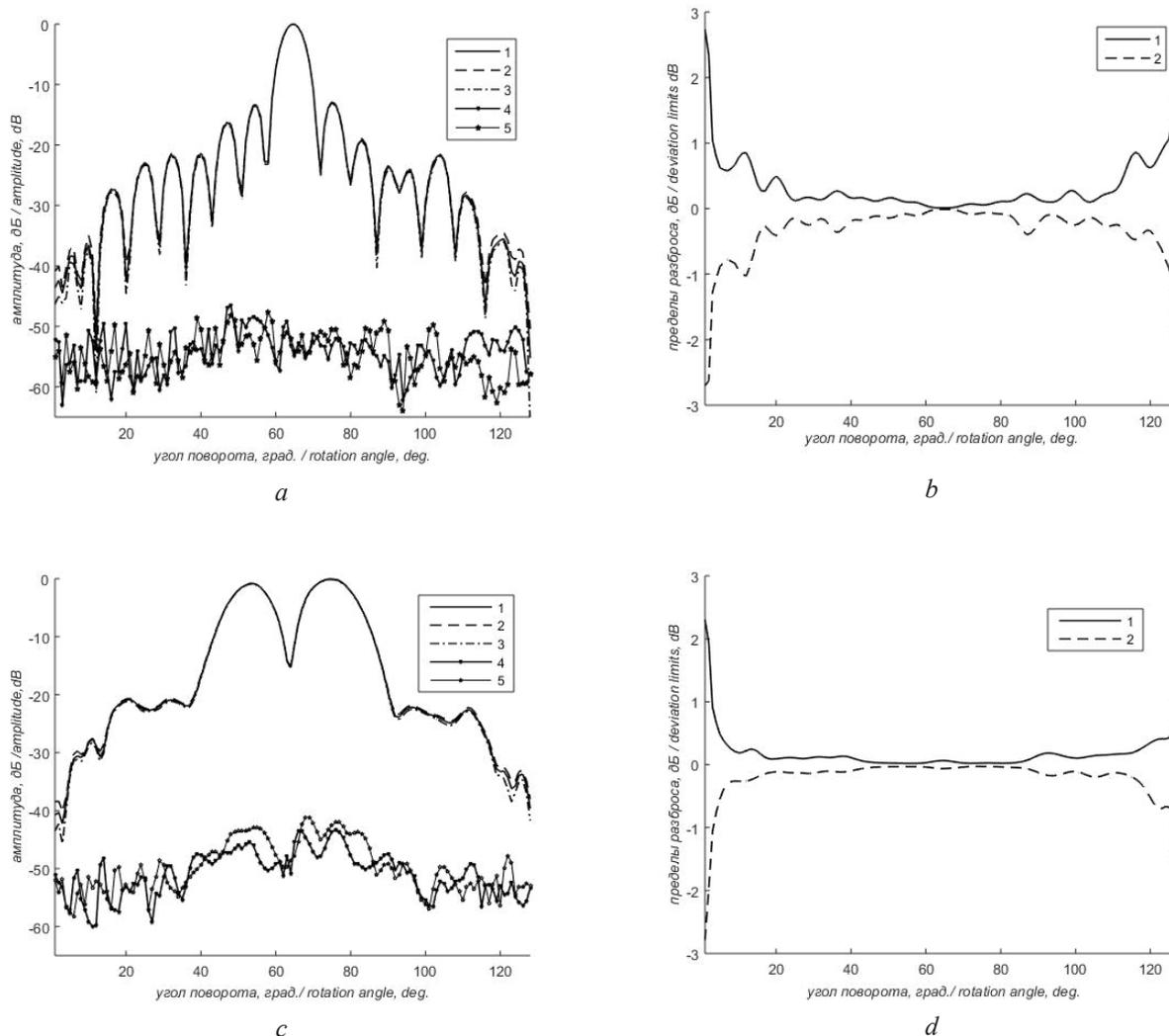


Рисунок 5 – Сечения диаграммы направленности линейки печатных вибраторных излучателей (*a*) и щелевой антенной решетки (разностный канал) (*c*): 1 – средние диаграммы направленности; 2 – максимальные и 3 – минимальные значения диаграммы направленности в каждом углу; 4, 5 – значения максимального и минимального отклонения от среднего, нормированные к максимуму диаграммы направленности; *b*, *d* – пределы разброса диаграмм направленности для тех же антенн соответственно: 1 – граница максимальных значений; 2 – граница минимальных значений

Figure 5 – Cross-sections of the directional pattern of the line of printed vibrator emitters (*a*) and the slot antenna array (difference channel) (*c*): 1 – average directional pattern; 2 – maximum and 3 – minimum values of directional patterns in each angle; 4, 5 – the values of the maximum and minimum deviations from the mean, normalized to the maximum of the directional pattern; *b*, *d* – the scatter patterns of the directional pattern for the same antennas respectively: 1 – the limit of the maximum values; 2 – the limit of the minimum values

На рисунке 5 приведены сечения ДН двух типов антенн и их границ разброса, рассчитанных по результатам обработки экспериментальных данных.

Полученные экспериментальные результаты показали, что:

- случайные погрешности измерения АФР поля для измерительного комплекса в целом имеют большие величины по сравнению с погрешностями только измерительной аппаратуры,

что очевидно. Главное, они не изменяют характер погрешностей – радиусы корреляции имеют тот же порядок. Это значит, что предложенные алгоритмы статистической обработки применимы для оценки погрешностей измерительных комплексов в целом;

- границы разбросов максимумов и минимумов восстановленных ДН, нормированные к максимуму средней ДН (рисунок 5*a*, *b* кривые 4, 5), позволяют реально оценить достижимый

динамический диапазон. Величина амплитуды квадратур для щелевой антенны выбрана ниже оптимальной, и реальный динамический диапазон, определяемый положением границ разбросов по отношению к максимуму ДН, на 10–12 дБ ниже, чем для аналогичных результатов на рисунке 5а;

– величина границ разброса зависит и от амплитуды восстанавливаемой ДН, и от углового положения анализируемой точки. Таким образом, зависимость границ разброса, приведенная на рисунке 5b, d является обобщенной характеристикой, так как определяет зависимость и от углов, и от амплитуды ДН, и может рассматриваться как наиболее объективная оценка погрешностей восстановления ДН для данной конкретной антенны, вызванных влиянием случайных погрешностей измерения АФР поля.

Заключение

Разработана практическая методика определения влияния случайных погрешностей измерения амплитудно-фазового распределения поля исследуемой антенны на точность восстановления ее дальнезонных характеристик (в первую очередь диаграммы направленности).

Экспериментально подтверждена возможность использования корреляционного анализа погрешностей измерения амплитудно-фазового распределения поля для оценки и контроля точности восстановления диаграммы направленности.

Спектральный анализ погрешностей измерения амплитудно-фазового распределения полей исследуемой антенны обеспечивает определение реального динамического диапазона и границ разброса восстанавливаемых диаграмм направленности для данного измерительного комплекса.

Основным преимуществом разработанной методики по сравнению с использованием математического моделирования является то, что оценка точности восстановления диаграммы направленности проводится по результатам обработки экспериментальных данных, полученных на конкретном измерительном комплексе, и не накладывает априори никаких предварительных требований на статистические параметры погрешностей.

Разработанная процедура оценки влияния случайных погрешностей может использоваться для разработки методики метрологической аттестации измерительных комплексов как средств измерения.

Работа выполнена в рамках задания ГПНИ «Электроника и фотоника 2.2.02» «Разработка и создание компактного полигона для измерения амплитудно-фазовых распределений и анализа характеристик излучения приемно-передающих модулей в сантиметровом диапазоне волн».

The work was carried out within the framework of the assignment of the GPII «Electronics and Photonics 2.2.02» «Development and creation of a compact polygon for measuring amplitude-phase distributions and analyzing the radiation characteristics of transceiver modules in a centimeter wave band».

Список использованных источников

1. Parini, C. Theory and Practice of Modern Antenna Range Measurements / C. Parini, S. Gregson, J. McCormik, D. Janse van Rensburg // The Institution of Engineering & Technology. – London, 2015. – 784 p.
2. Gregson, S. Principles of planar – near – field antenna measurements / S. Gregson, J. McCormik, C. Parini // Electromagnetic waves series. Vol.53. The Institution of Engineering & Technology. – London, 2007. – P. 95–103.
3. Курочкин, А.П. Теория и техника антенных измерений / А.П. Курочкин // Антенны. – 2009. – № 7. – С. 39–45.
4. Виноградов, А.Д. Методика антенных измерений, их современное применение и автоматизация / А.Д. Виноградов // Антенны. – 2010. – № 5. – С. 15–21.
5. Васендин, С.В. Исследование антенн и характеристик рассеяния радиолокационных объектов по планарным измерениям в ближней зоне / С.В. Васендин, А.В. Кирпанев // Успехи современной радиоэлектроники. – 2013. – № 2. – С. 63–68.
6. Орехов, Ю.И. Автоматизированный комплекс для измерения амплитудно-фазовых распределений диэлектрических излучателей в ближней зоне / Ю.И. Орехов [и др.] // Антенны. – 2010. – № 7. – С. 38–43.
7. Малай, И.М. Применение метода статистических испытаний для оценки метрологических характеристик антенных автоматизированных измерительных комплексов ближней зоны / И.М. Малай, М.С. Шкуркин // Антенны. – 2014. – № 12. – С. 50–55.
8. Гайдышев, И.В. Анализ и обработка данных. Специальный справочник / И.В. Гайдышев // СПб.: Питер, 2001. – 750 с.

References

1. Parini C., Gregson S., McCormik J., Janse van Rensburg D. Theory and Practice of Modern Antenna

Range Measurements; The Institution of Engineering & Technology. London, 2015, 784 p.

2. Gregson S., McCormik J., Parini C. Principles of planar – near – field antenna measurements. *Electromagnetic waves series*, vol. 53, The Institution of Engineering & Technology, London, 2007, pp. 95–103.

3. Kurochkin A. [Theory and technology of antenna measurement]. *Antenny [Antennas]*, 2009, no. 7, pp. 39–45 (in Russian).

4. Vinogradov A. [Methods of antenna measurements, their modern application and automatization.] *Antenny [Antennas]*, 2010, no. 5, pp. 15–21 (in Russian).

5. Vasendin S., Kirpanev A. [Investigation of antennas and characteristics of radar objects dispersion

as per planar measurements in the near zone]. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki [Achievements of Modern Radioelectronics]*, 2013, no. 2, pp. 63–68 (in Russian).

6. Orehov J., Makarychev N., Gainulina E., Tihonov A., Kravtsov D. [Automated complex for amplitude-phase distributions measuring of dielectric radiators in the near zone]. *Antenny [Antennas]*, 2010, no. 7, pp. 38–43 (in Russian).

7. Malai I., Shkurkin M. [Application of statistical test method for evaluation of metrological characteristics of antenna automated measuring systems in the near zone]. *Antenny [Antennas]*, 2014, no. 12, pp. 50–55 (in Russian).

8. Gaidyshev I. Analysis and data treatment, Saint-Petersburg, Piter Publ., 2001, 750 p.

УДК 623.4.052

Методы повышения эффективности работы двухканального оптико-электронного прицела

Фёдорцев Р.В.¹, Шкадаревич А.П.², Ийд Кусай Мохамад^{3,1}, Фуфаев А.В.^{2,1}

¹Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

²Научно-технический центр «ЛЭМТ» БелОМО,
ул. Макаенка, 23, корп. 1, г. Минск 220114, Беларусь

³Дамасский университет,
Mousalam Baroudy, г. Дамаск, Сирийская Арабская Республика

Поступила 10.04.2018

Принята к печати 05.06.2018

Актуальной задачей производителей прицельной техники является разработка автономных моделей оптических прицелов, способных самостоятельно осуществлять измерение и анализ входных параметров в боевых условиях и на их основе вносить корректировки в систему наведения и механизмы прицеливания. Цель работы заключалась в исследовании методов повышения эффективности работы двухканального оптико-электронного прицела модели DNS-1 для стрелкового оружия посредством анализа степени влияния внешних факторов среды определяющих траекторию полета пули и точность ее попадания в цель.

Рассмотрен вариант практической реализации прицела DNS-1 со встроенным баллистическим вычислителем, учитывающим: скорость и направление ветра, угол места цели, температуру окружающей среды, относительную влажность и атмосферное давление. Проведена оценка жесткости и устойчивости конструкции прицела при креплении его на ствольной коробке по направляющей «ласточкин хвост» и на планке «Пикатинни». В варианте с планкой *Picatinny rail* нагрузки составляют меньшую величину и распределяются более равномерно вдоль линии корпуса прицела. Проведены расчеты траектории движения пули от патрона 7Н10 калибром 5,45 мм для АК-74Н на дистанциях 300 и 1000 м. На дистанции 300 м и при величине превышения 53,2 см угол бросания практически не меняется и находится в пределах 0,2°. Для дальних дистанций до 1000 м баллистический угол возрастает до 3°. Предложен метод измерения ветровой нагрузки с применением теплового анемометра на базе датчика *Dantec Dynamics 55P11*. Выполнена оптимизация конструкции корпуса анемометра и проведено моделирование ветровой нагрузки, получены распределения полей скорости ветра при аэродинамической продувке узла анемометра в диапазоне от 2 до 20 м/с. Предложен метод измерения угла места цели с применением акселерометра на базе датчика *SC4830-D07* с точностью 0,00179°.

Представленные результаты исследований показывают возможность создания комплексной автоматизированной системы управления огнем для стрелкового оружия.

Ключевые слова: величина поправки, баллистический вычислитель, анемометр, инклинометр.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-182-196

Адрес для переписки:

Фёдорцев Р.В.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: fedortsev@bntu.by

Address for correspondence:

Fiodortcev R.V.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: fedortsev@bntu.by

Для цитирования:

Фёдорцев Р.В., Шкадаревич А.П., Ийд Кусай Мохамад, Фуфаев А.В.
Методы повышения эффективности работы двухканального оптико-электронного прицела.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 2. – С.182–196.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-182-196

For citation:

Fiodortcev R.V., Shkadarevich A.P., Qusai Eid Mohammad, Fufaev A.V.
[Methods for increasing the efficiency of a dual-channel opto-electronic sight].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 2, pp. 182–196 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-182-196

Methods for increasing the efficiency of a dual-channel opto-electronic sight

Fiodortcev R.V.¹, Shkadarevich A.P.², Qusai Eid Mohammad^{3,1}, Fufaev A.V.^{2,1}

¹Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

²Scientific Technical Center «LEMT» BelOMO,
str. Makayonka, 23, building. 1, Minsk 220114, Belarus

³Daamas University,
Mousalam Baroudy, Damascus, Syrian Arab Republic

Received 10.04.2018

Accepted for publication 05.06.2018

Abstract

The actual task of the aiming equipment manufacturers is to develop autonomous models of optical sights capable of independently measuring and analyzing input parameters in combat conditions and on their basis to make corrections to the guidance system and aiming mechanisms. The aim of the study was to investigate methods for increasing the efficiency of the dual-channel opto-electronic sight of the DNS-1 model for small arms by analyzing the degree of influence of external environmental factors determining the trajectory of a bullet flight and the accuracy of its hit into the target.

The variant of the practical implementation of the DNS-1 sight with an integrated ballistic computer, taking into account: wind speed and direction, target location angle, ambient temperature, relative humidity and atmospheric pressure is considered. Evaluation of the rigidity and stability of the sight design was made when fastening it to the receiver along the «swallowtail» guide and on the «Picatinny» bar. In the variant with Picatinny rail, the loads are smaller and distributed more evenly along the line of the body of the sight. Calculations of the trajectory of the bullet from the cartridge 7H10 with a caliber of 5.45 mm for the AK-74H at distances of 300 and 1000 m were carried out. At a distance of 300 m and at a value exceeding 53.2 cm, the throwing angle remains practically unchanged and lies within 0.2°. For long distances up to 1000 m, the ballistic angle increases to 3°. A method for measuring wind load using a thermal anemometer based on the Dantec Dynamics 55P11 sensor is proposed. Optimization of the anemometer housing design was performed and wind load simulation was performed, wind field velocity distribution was obtained in the aerodynamic blowdown of the anemometer assembly in the range from 2 to 20 m/s. A method is proposed for measuring the angle of the target site using an accelerometer based on the SCA830-D07 sensor with an accuracy of 0.00179°.

The presented research results show the possibility of creating a complex automated fire control system for small arms.

Keywords: magnitude of correction, ballistic calculator, anemometer, inclinometer.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-182-196

Адрес для переписки:

Фёдорцев Р.В.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: fedortsev@bntu.by

Address for correspondence:

Fiodortcev R.V.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: fedortsev@bntu.by

Для цитирования:

Фёдорцев Р.В., Шкадаревич А.П., Ийд Кусай Мохаммад, Фуфаев А.В.
Методы повышения эффективности работы двухканального оптико-электронного прицела.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 2. – С. 182–196.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-182-196

For citation:

Fiodortcev R.V., Shkadarevich A.P., Qusai Eid Mohammad, Fufaev A.V.
[Methods for increasing the efficiency of a dual-channel opto-electronic sight].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 2, pp. 182–196 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-182-196

Введение

Современная концепция развития вооружений направлена на создание высокоточных прицелов и автоматизированных систем управления огнем (СУО) преимущественно для уничтожения дорогостоящей легкобронированной и бронетанковой техники [1]. Однако повышение эффективности поражения цели на 20–30 % такими средствами наведения приводит к увеличению массы и габаритных размеров изделия, а также к снижению ее мобильности [2]. Актуальной задачей любого производителя прицельной техники на современном этапе становится разработка таких моделей оптических прицелов, которые обеспечат максимальную автономность изделия с точки зрения его функционирования в боевых условиях, способность самостоятельно осуществлять оценку и измерение ряда параметров и на их основе вносить корректировки в систему наведения и механизмы прицеливания.

Такие направления успешно развиваются за рубежом. Например, агентство перспективных исследовательских проектов министерства обороны США *DARPA* в рамках проекта *EXACTO* по созданию высокоточного снайперского комплекса совместно с компанией *SNL* занимается разработкой корректируемых пуль калибра 12,7 мм для гладкоствольного оружия. Система управления осуществляет изменение траектории полета пули посредством лазерного луча в зависимости от скорости и направления ветра, погодных условий или местоположения стрелка относительно цели [3].

Другая американская компания *Tracking Point* представила макет компьютеризированного снайперского комплекса *PGF (Precision Guided Firearm* – высокоточное огнестрельное оружие). Стрелковое оружие оснащается специальным оптическим прицелом с электронным блоком управления, включающим модуль беспроводной сети, обеспечивающий его синхронизацию с планшетным компьютером на базе операционных систем *iOS* или *Android*. Вся информация о баллистических и метеорологических условиях ведения огня фиксируется на встроенном в прицел накопителе информации. Электронный блок, помимо модуля беспроводной сети, содержит метеорологические датчики (давления и температуры), баллистический калькулятор, компас, а также *USB*-порт

для подключения к персональному компьютеру [4]. Однако в данной модели не предусмотрена процедура автоматизированного ввода поправки на скорость ветра [5].

В зависимости от области применения большинство оптических прицелов получили определенные конструктивные специализации под конкретные виды оружия. Точность попадания в цель определяется качественной пристрелкой оружия на заданную дистанцию и зависит от ряда внешних и внутренних факторов. К внутренним факторам, как правило, относят конструктивные и технологические: жесткость посадки оптического прицела на планку ствольной коробки или его установку на направляющую тип «ласточкин хвост»; предельно допустимые значения винтовых механизмов вертикальной и горизонтальной выверки; устойчивость корпуса прицела и его внутренних составных компонентов к воздействию внешних знакопеременных нагрузок вследствие выстрела, ударов или падения; качество изготовления и сборки оптических деталей прицела; системы точного определения дистанции до объекта и многие другие. Внешние факторы определяются типом и маркой используемого боеприпаса и видом оружия, направлением действия и скоростью ветра, углом установки места цели, метеорологической дальностью видимости, температурой окружающей среды и периодом времени суток, а также прочими факторами, имеющими случайный и периодический характер. Учет большинства перечисленных выше факторов требует определенного уровня профессиональной подготовки и навыков от стрелка, а также подразумевает наличие у него значительный практического опыта в этой области.

Цель работы заключалась в разработке методов повышения эффективности работы двухканального оптико-электронного прицела посредством анализа степени влияния внешних факторов среды определяющих траекторию полета пули и точность ее попадания в цель.

Объект исследования

В качестве базового варианта конструкции рассмотрим двухканальный оптический прицел марки *DNS-1*, выпускаемый Научно-техническим центром «ЛЭМТ» БелОМО. Основные оптические и механические параметры прицела приведены в таблице 1.

Таблица 1/Table 1

Основные тактико-технические характеристики прицела DNS-1

The main tactical and technical characteristics of the sight of DNS-1

Наименование параметра Parameter name	Дневной канал Day channel	Ночной канал Night channel
Видимое увеличение, крат Visible magnification, times	2,9	2,9
Угловое поле зрения, угл. град Angular field of view, angular hailstones	11	12
Фокусное расстояние объектива, мм Focal length of the lens, mm		80
Относительное отверстие Relative aperture (F-number /T-number)	–	1,67/1,8
Удаление выходного зрачка, мм Removal of exit pupil, mm		30
Диапазон диоптрийной настройки, дптр. Diopter adjustment range, diopter		–5... +5
Диапазон выверки, угл. град Reconciliation range, angular degrees		±1
Шаг выверки, угл. мин Step of alignment, angular mines	1 (3 см на дистанции 100 м) 1 (3 cm at a distance of 100 m)	
Напряжение питания, В Supply voltage, V		3 (2×1,5)
Габаритные размеры, мм: Overall dimensions, mm:		
исполнение 1 execution 1		240×195×81
исполнение 2 execution 2		240×115×79
Масса с элементами питания, кг: Weight with batteries, kg:		
исполнение 1 execution 1		1,3
исполнение 2 execution 2		1,2
Диапазон рабочих температур, °С Operating temperature range, °С		–40... +50
Типы оружия, на которые устанавливается: Types of weapons that are installed:	Стрелковое оружие с боковой планкой типа «ласточкин хвост» Small arms with a side bar of the «swallowtail» type	
исполнение 1 execution 1	стрелковое оружие с планкой типа «Picatinny rail» Small arms with a bar like «Picatinny rail»	
исполнение 2 execution 2		

Прицел содержит два параллельных комбинированных канала для круглосуточного наблюдения и прицеливания (рисунок 1).

Дневной канал работает в видимом спектральном диапазоне и включает следующие оптические элементы: телеобъектив 1–2, сетку 3, пятикомпонентную линзовую оборачивающую систему 4–8 и призму AP-90° 9 для поворота оптической оси. Ночной канал рассчитан на работу в пассивном режиме. Ночной канал включает: четырехкомпонентный объектив 10 большой апертуры и электронно-оптический преобразователь (ЭОП) 3-го поколения 11 ЭПМ105Г-02-22А. В качестве системы защиты ночного канала от ярких источников засветки, а также для проверки работоспособности ЭОП в конструкции прицела предусмотрен фотоприемник 14, определяющий уровень освещенности объектов и фона и отключающий канал при превышении порогового значения. Изображения, формируемые в дневном и ночном каналах, проецируются на диагональную грань светоделительной куб-призмы К-0° 12 и далее посредством окуляра Эрфле 13 переносятся в плоскость выходного зрачка.

зватель (ЭОП) 3-го поколения 11 ЭПМ105Г-02-22А. В качестве системы защиты ночного канала от ярких источников засветки, а также для проверки работоспособности ЭОП в конструкции прицела предусмотрен фотоприемник 14, определяющий уровень освещенности объектов и фона и отключающий канал при превышении порогового значения. Изображения, формируемые в дневном и ночном каналах, проецируются на диагональную грань светоделительной куб-призмы К-0° 12 и далее посредством окуляра Эрфле 13 переносятся в плоскость выходного зрачка.

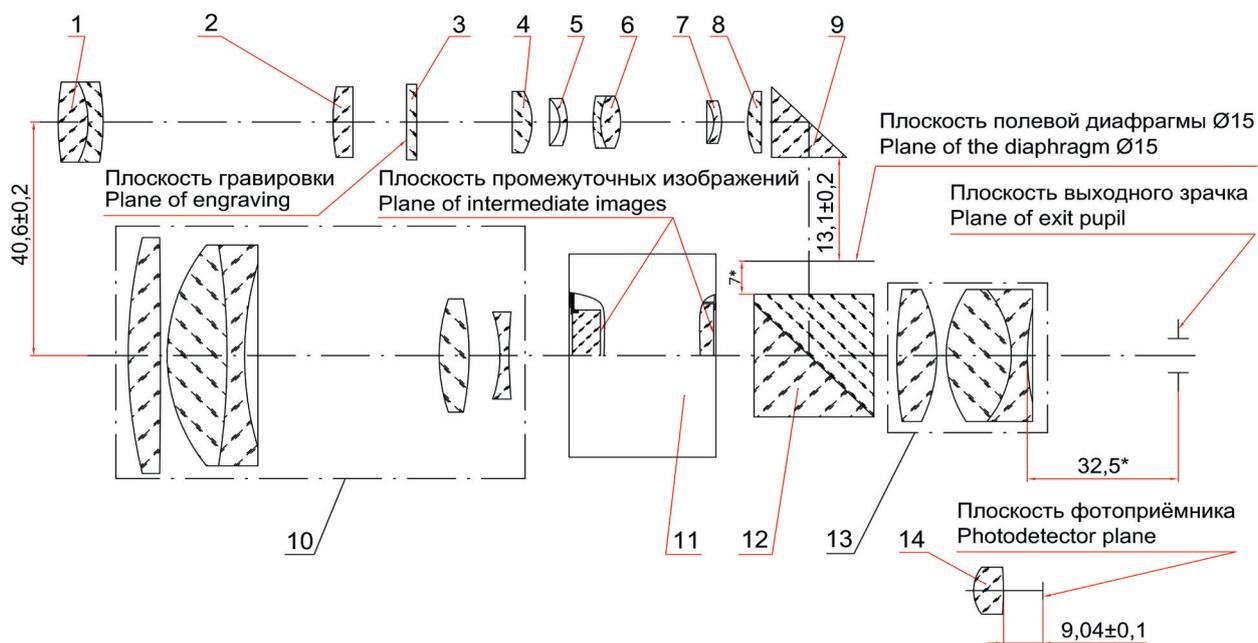


Рисунок 1 – Оптическая схема прицела DNS-1
Figure 1 – Optical Scope of the DNS-1

Существует две модификации оптического прицела по элементам крепления на ствольной коробке: «исполнение 1» боковое – на планку типа «ласточкин хвост» (*dovetail*) шириной 14,5 мм для установки на штурмовые винтовки АК (автомат Калашникова) всех модификации, пистолеты-пулеметы АКС-74УН, ПП-19 «Бизон-2», пулеметы РПКН, ПКН, ПКМН и другие, или «исполнение 2» верхнее – с планкой типа *Picatinny rail* (*MIL-STD-1913*) для АК-12. Для повышения жесткости конструкции кронштейн с направляющими планками «ласточкин хвост» имеет монолитное исполнение с корпусом оптического прицела, два встроенных шарнира и поворотный рычаг обеспечивают точную установку прицела относительно ствола оружия, его надежную фиксацию и быструю смену при необходимости. В варианте конструкции с планкой *Picatinny rail* оптический прицел имеет возможность передвижения по рельсу вперед-назад или жесткой фиксации посредством болтов, тисков или рычагов. Для крепежных стяжек, а также во избежание смещения закрепленного прицела при отдаче и деформации крепления при термическом расширении и охлаждении ствола во время стрельбы в планке через равные промежутки проделаны поперечные прорезы, размеры которых стандартизированы *NATO Accessory Rail STANAG 4694*.

Программные методы оценки жесткости элементов конструкции прицела

Устойчивость оптического прицела к воздействию внешних знакопеременных нагрузок определяется величиной отдачи, включающей следующие взаимосвязанные параметры: импульс, энергию, силу и мощность (ГОСТ 28653-90). В соответствии с третьим законом Ньютона импульс отдачи I_b (выстрела) рассматривается как внутренняя сила, действующая вследствие движения пули v_b и порохового заряда:

$$I_b = \frac{m_b}{g} \left(1 + \frac{v_g}{2g} n_\omega v_0 \right) v_0,$$

где m_b – масса пули; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; $v_g = 1275 \text{ м/с}$ – скорость истечения газов из канала ствола; $n_\omega = (8-10) \cdot 10^{-6} \text{ кг/Дж}$ – коэффициент использования порохового заряда; v_0 – начальная скорость пули, м/с.

Примерные соотношения между начальной скоростью пули, ее весом и величиной импульса отдачи представлены в источнике [6].

Энергия отдачи E_{rec} характеризуется степенью воздействия оружия на стрелка после выстрела:

$$E_{rec} = \frac{g}{2m_{weap}} I_b^2,$$

где m_{weap} – масса оружия.

При выстреле возможно три варианта удержания оружия в положении: лежа, сидя или стоя. Рассмотрим наименее устойчивый случай – положение стоя с удержанием оружия и прицела на вытянутых руках. При средней массе тела стрелка 70 кг вес его рук составляет примерно 5,7 % ($m_h = 4$ кг) от общей массы тела. Тогда для обеспечения устойчивости при стрельбе необходимо выполнение условия:

$$g_{act} = \frac{a_b \cdot m_b}{m_{weap} + 2 \cdot m_h} < g_{lim},$$

где $a_b = \frac{v_0^2}{2\ell}$ – ускорение пули, ℓ – длина ствола оружия; g_{lim} – предельно допустимое значение перегрузки (возможность удержания оружия в руках). В таблице 2 представлены результаты расчетов фактических значений перегрузки g_{act} для различных моделей стрелкового оружия, на которых возможна установка оптического прицела марки DNS-1. Анализ полученных результатов показывает, что при увеличении калибра патрона, а также длины ствола оружия фактическое значение перегрузки существенно снижается и, как следствие, уменьшается воздействие ударных нагрузок на элементы крепления оптического прицела. Кроме того, в процессе проведения расчетов на прочность закладывается коэффициент запаса уровне $k = 1,5-2$, что обеспечивает дополнительную надежность изделия в ходе эксплуатации.

Таблица 2/Table 2

Основные характеристики стрелкового оружия и боеприпасов

Main characteristics of small arms and ammunition

Тип и модель оружия	Размеры патрона (калибр×длина), мм	Масса пули m_b , грамм	Масса оружия m_{weap} , грамм	Длина ствола оружия ℓ , мм	Начальная скорость пули v_0 , м/с	Длительность импульса (время выстрела) t , мс	Фактическое значение перегрузки g_{act}
Type and model of weapons	Dimensions of the cartridge (gauge×length), mm	Bullet weight m_b , grams	Mass of weapons m_{weap} , gram	Length of the barrel of the weapon ℓ , mm	Initial velocity of the bullet v_0 , m/s	Pulse width (shot time) t , ms	Actual overload value g_{act}
АКМ-74	5,45×39	3,56...3,62	3300	372	870...910	0,9	35
АК-74У	5,45×39	3,20...3,23	2700	207	300...303	0,6	42
ПП-19							
Бизон-2 Bison-2	9×18	6,1	2700	230	320	0,7	13
РПКН	7,62×39	8,2	5000	590	745	1,0	30

В программном пакете *SolidWorks* выполнено 3D-моделирование конструкции оптического прицела DNS-1 в двух модификациях элементов крепления. В программном пакете *Solid Simulation* проведен комплекс численных исследований на ударную устойчивость и вибропрочность оптического прицела при воздействии различного рода знакопеременных нагрузок. Критерием оценки устойчивости конструкции являлось соблюдение условия

$\sigma_v \geq \sigma_y$. Оценка предельно допустимой величины воздействия деформаций σ_v осуществлялась по анализу напряжений фон Мизеса возникающих в материале корпуса прицела, изготовленного из сплава алюминия с магнием и медью и дополнительно подвергнутого термообработке. Для материала Д16Т напряжение при относительном растяжении 0,2 % составляет 28 кг/мм² и напряжения смятия при относительной деформации 0,2 % – 35 кг/мм².

В варианте «исполнение 1» оптический прицел условно фиксировался по трем отверстиям $\varnothing 4,1$ мм для закрепления заклепками в направляющей боковой планке на ствольной коробке. В варианте «исполнение 2» оптический прицел закрепляли сверху на планке *Picatinny rail* по двум отверстиям $\varnothing 4,1$ мм. Направление действия ударного ускорения совпадало с оптической осью прицела. Расчет проводили для АК74 с учетом заложенного коэффициента запаса $k = 2$, величина ускорения задавалась на уровне 80 g.

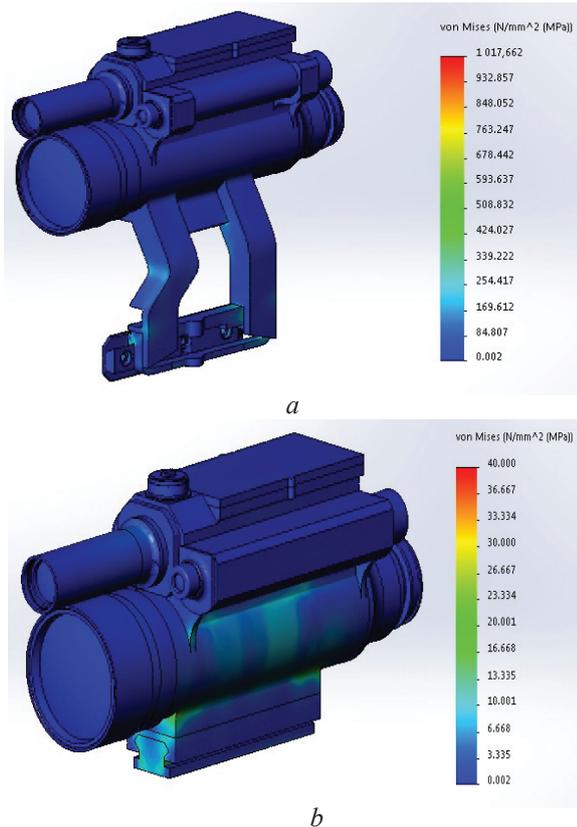


Рисунок 2 – Эпюры распределения напряжений деформации фон Мизеса для варианта исполнения оптического прицела с механизмом крепления: «ласточкин хвост» (a) и планка *Picatinny rail* (b)

Figure 2 – Diagrams of von Mises strain strain distribution for the version of the optical sight with the fastening mechanism: «dovetail» (a) and «Picatinny rail» (b)

Как видно из результатов моделирования, для варианта исполнения «ласточкин хвост» (рисунок 2a) локальными зонами концентрации нагрузок на уровне $\sigma_y = 1,76 \cdot 10^{-7}$ Н/м² являются отверстия для фиксации планки винтами и внешние ребра кронштейна, что объясняется смещением суммарного центра масс в верхнюю часть оптического прицела относительно механизма его крепления. В варианте конструкции планка *Picatinny rail* (рисунок 2b)

нагрузки составляют меньшую величину на уровне $\sigma_y = 1,2 \cdot 10^{-9}$ Н/м² и распределяются более равномерно с обеих сторон вдоль линии корпуса прицела и той его части в которой размещен механизм крепления.

Результирующие перемещения элементов конструкции прицела при расчете устойчивости для обоих случаев представлены на рисунке 3a и b. При креплении по направляющим «ласточкин хвост» максимальные перемещения $URES = 0,82$ мм характерны для крайних точек изделия на оправе окуляра, крышке корпуса обрачивающей системы и оправе телеобъектива дневного канала. При креплении по направляющим *Picatinny rail* максимальные деформации $URES = 0,074$ мм наблюдаются на оптической поверхности первой линзы объектива ночного канала. Сравнение указанных предельных параметров показывает, что во втором случае максимальные деформации на порядок ниже.

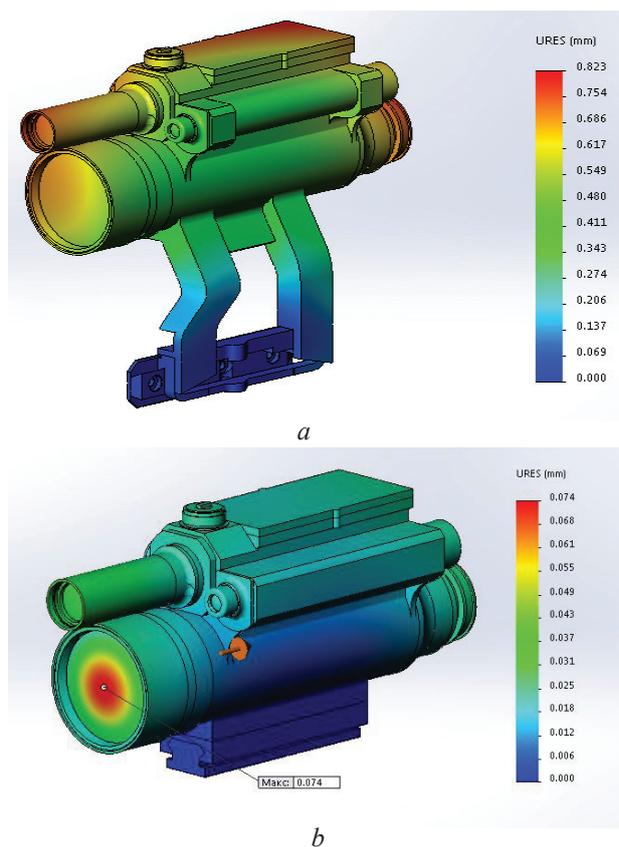


Рисунок 3 – Эпюры перемещения элементов прицела для варианта исполнения оптического прицела с механизмом крепления: «ласточкин хвост» (a) и планка *Picatinny rail* (b)

Figure 3 – Diagrams for moving the sight elements for the version of the optical sight with the fastening mechanism: «dovetail» (a) and «Picatinny rail» (b)

В целом оба варианта конструкции оптического прицела способны выдержать ударную нагрузку при указанных значениях, что подтверждается результатами проведенной серии лабораторных испытаний опытных образцов изделий на ударном стенде «ELSTAR-STM50». Прицелы подвергались воздействию 100 механических ударов в направлении оптической оси с ускорением 3000 м/с^2 (300 g) и длительностью импульса от 0,5 до 2,0 мс.

Определение баллистических параметров

Точность наводки оружия на цель определяется точностью расчета баллистической траектории движения пули и степенью воздействия внешних факторов среды. Для решения этой задачи осуществляют предварительный математический расчет значений по пристрелке оружия с учетом различных дистанций и углов стрельбы, а также скорости ветра. Полученные численные значения в виде поправок в последующем выставляются на механизме горизонтальной и вертикальной выверки оптического прицела. Цель работы заключалась в разработке портативной конструкции модуля баллистического вычислителя на основе расчетных данных полученных в ходе численных методов исследования в программных пакетах «Баллистический калькулятор 2.44» и *Ballistic Explorer Ver 6*.

В исходные данные были заложены параметры, учитывающие скорость v_w и направления ветра, а также наклонение оси визирования относительно линии горизонта ε .

Принцип работы баллистического калькулятора рассмотрим на примере расчета траектории движения пули от патрона 7Н10 калибром 5,45 мм для штурмовой винтовки АК-74Н с боковой планкой для установки ночного оптического прицела [7]. Исходными данными для расчета выступали следующие параметры: масса патрона – 3,43 г; начальная скорость пули $v_b = 880 \text{ м/с}$. Переменными данными являлась дистанция пристрелки АК-74Н, которая выбиралась $D = 100, 200$ и 300 м .

Пристрелка оптического прицела на дистанции 100 м обеспечивает наилучшую видимость прицельной сетки и мишени при фокусировке. На прицелах с отстройкой параллакса, на барабанчиках механизма выверки поправки вводится в угловых минутах соответствующих величине смещения (в см) на дальность дистанции $D = 50, 100, 200, 300, \dots, 1000 \text{ м}$.

Исходя из баллистических особенностей траектории движения, пуля на ближней дистанции 100–200 м имеет стабильные показания баллистики и на дистанции 300 м сохраняет эффективную энергию выстрела 657 Дж. С увеличением дистанции до 1000 м энергия уменьшается почти в 6 раз и составляет около 118 Дж.

На рисунке 4 представлены результаты расчета баллистики пули летящей до цели, установленной на дистанции 300 м без введения поправок. Исходя из величины превышения 53,2 см баллистический угол (бросания) практически не меняется и находится в пределах $0,2^\circ$.

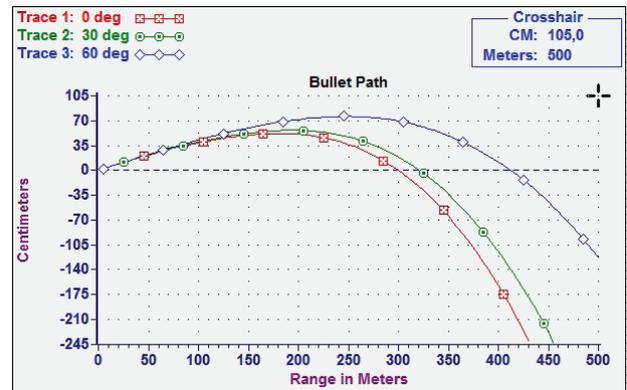


Рисунок 4 – Траектория пули на дистанции 300 м при наклонении оси визирования «без поправки»: пуля 1 при $\varepsilon = 0^\circ$ (красный); пуля 2 при $\varepsilon = 30^\circ$ (зеленый); пуля 3 при $\varepsilon = 60^\circ$ (синий)

Figure 4 – The trajectory of the bullet at a distance of 300 m when the axis of sight is tilted «without correction»: bullet 1 at $\varepsilon = 0^\circ$ (red); bullet 2 at $\varepsilon = 30^\circ$ (green); bullet 3 at $\varepsilon = 60^\circ$ (blue)

Из анализа полученных значений видно, что для дальних дистанций до 1000 м баллистический угол возрастает соответственно до 3° (рисунок 5).

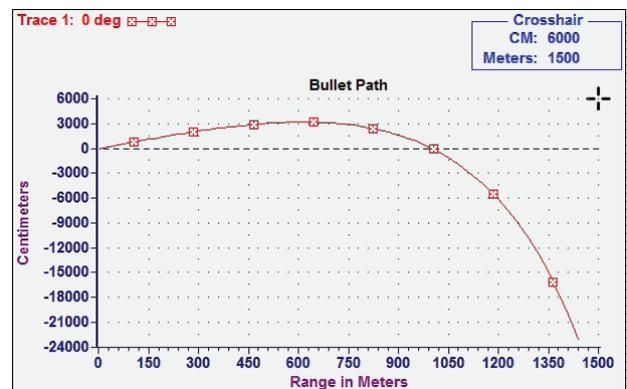


Рисунок 5 – Траектория движения пули на дистанции 1000 м при угле наклона ствола оружия 0 градусов

Figure 5 – The trajectory of the bullet movement at a distance of 1000 m with the angle of the weapon's trunk 0 degrees

При нахождении цели выше уровня горизонта (ВЦ) (например, цель в верхних этажах здания – летящий вертолет, снайпер на горном хребте и т. д.) или ниже уровня горизонта (например, цель в каньоне) необходимо учитывать угол наклона между линией визирования и уровнем горизонта ε (рисунок 6).

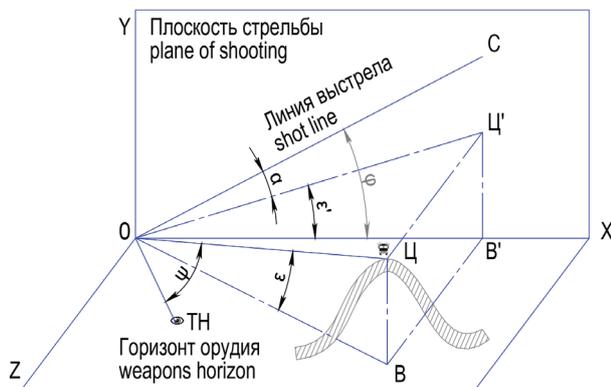


Рисунок 6 – Схема наводки орудия в цель
Figure 6 – Scheme of gun aiming at the target

Максимально допустимый диапазон значений для оптического прицела *DNS-1* и определяется предельной величиной поправок (число кликов), выставляемых на барабане вертикальной выверки (вращение по часовой стрелке). Число кликов n округляется до ближайшего целого значения.

При больших углах наклона на траекторию движения пули значительное влияние оказывает сила тяжести g , смещающая баллистическую кривую вниз относительно цели. Поэтому необходимо удерживать ствол оружия ниже прицельной марки.

В ходе исследований установлено, что скорость ветра в перпендикулярном направлении [западное (09:00) – восточное (03:00)] и наоборот [восточное (03:00) – западное (09:00)] оказывает существенное влияние на траекторию полета пули. Так, например, при спокойной силе ветра на уровне 2–4 м/с величина смещения пули на дистанции 100 м составит $z = 2,9$ см (1 клик), на 200 м – $z = 11,7$ см (2 клика), на 300 м – $z = 26,2$ см (3 клика). При порывистом ветре порядка 15–16 м/с эти показатели уже составят: на 100 м – $z = 11,6$ см (4 клика), на 200 м – $z = 46,6$ см (8 кликов), на 300 м – $z = 113,7$ см (13 кликов). В механизме выверки прицела *DNS-1* один клик маховика равен 1 угловой минуте, а общий

допустимый диапазон вращений составляет 60 угловых минут.

Если пуля летит строго навстречу ветру направление [северное (12:00) – южное (06:00)], ее скорость уменьшается и пробойна в мишени будет расположена ниже. Если пуля летит попутно направлению ветра [южное (06:00) – северное (12:00)], ее скорость возрастает; для действия силы тяжести остается меньше времени, и пробойна в мишени будет расположена выше. Однако отклонение, связанное с этим компонентом вектора скорости ветра, можно игнорировать. Поскольку при скорости ветра 10 и 20 м/с это отклонение составляет только 0,5 и 1,0 угловую минуту. Выставить такие значения на оптическом прицеле *DNS-1* не представляется возможным, так как один щелчок механизма выверки обычного равен 1 угловой минуте, а максимальное значение 1,4 угловых минут соответствует скорости ветра 28 м/с, при котором объекты внешней среды уже становятся неустойчивыми. Компенсация этих отклонений всегда выполняется с помощью горизонтального механизма выверки, чтобы переместить вершину прицельного угольника сетки прицела направо, когда направление ветра (09:00→03:00), и налево, когда направление ветра (В→З) (рисунок 7).

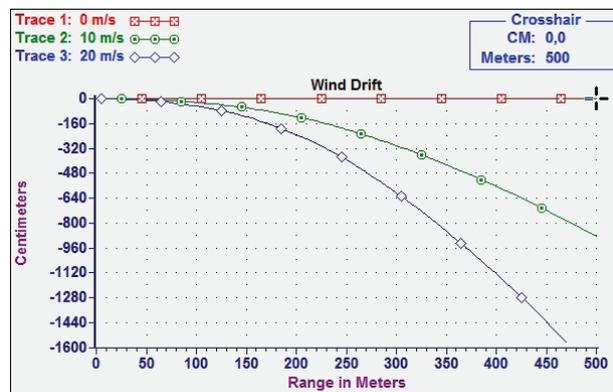


Рисунок 7 – Траектория пули до цели на дистанции (300 м) при дрейфе ветра «без поправки» в направлении (09:00→03:00): пуля 1 при скорости ветра 0 м/с (красный); пуля 2 при скорости ветра 10 м/с (зеленый); пуля 3 при скорости ветра 20 м/с (синий)

Figure 7 – The trajectory of the bullet to the target at a distance (300 m) with the wind drift «without correction» in the direction (09:00→03:00): bullet 1 at a wind speed of 0 m/s (red); bullet 2 at a wind speed of 10 m/s (green); bullet 3 at a wind speed of 20 m/s (blue)

Обычно диапазон выверки механизмов прицела составляет $\pm 1^\circ$ (или ± 60 угловых минут), поэтому нет возможности исправлять отклонения баллистической пути пули при дрейфе ветра при значении отклонения больше (60 угловых минут).

Методы измерения ветровой нагрузки

Скорость ветра оценивается в м/с по шкале Бофорта у поверхности земли на высоте 10 м. Традиционные методы измерения указанных параметров предусматривают беспроводное подключение автономных метеостанций типа *Kestrel*. Инновационными разработками являются внешние баллистические калькуляторы *Vampire Solo* от компании ЗАО «Инновационные оружейные технологии» (*IWT*), в которых ввод метеоданных о силе и направлении ветра, параметрах температуры окружающей среды, атмосферном давлении и влажности осуществляется ультразвуковым способом посредством беспроводного подключения [8].

Для измерения скорости ветра в конструкции разрабатываемого оптического прицела целесообразно использовать встроенный тепловой анемометр, отличающийся небольшими габаритными размерами и высокой чувствительностью. Принцип действия анемометра основан на увеличении тепловых потерь нагретого тела при увеличении скорости обдувающего более холодного газа. В качестве регистрирующего сенсора используется открытая тонкая металлическая проволока, нагреваемая выше температуры окружающей среды электрическим током.

Проволока изготавливается из металла с положительным температурным коэффициентом сопротивления. При установке в измерительном модуле оптического прицела *DNS-1* с открытым сквозным окном и контакте с проходящим воздушным потоком наиболее важным параметром является прочность на растяжение при максимальной скорости ветра. Оптимальным вариантом для практической реализации в данном случае является применение проволоки из вольфрама, обеспечивающей по сравнению с другими материалами (платина, родий, иридий и никель) наилучшую прочность на растяжение 250 N/cm^2 и теплопроводность $1,78 \text{ W/cm/K}$.

Односенсорный миниатюрный зонд проволока из вольфрамовой нити подвешен между двумя зубцами, нанесенными на электроизолирующую подложку. Ось зонда перпендикулярна направлению воздушного потока. Конвективный теплообмен Q между проволокой и внешней средой является функцией скорости ветра v_w :

$$Q = (T_w - T_0) \cdot Aw \cdot h = A + Bv_w^n,$$

где T_w и T_0 – соответственно температура на поверхности проволоки и проходящего воздушного потока; Aw – площадь поверхности проволоки; h – коэффициент теплопередачи материала проволоки; $n \approx 0,5$ – коэффициент скорости ветра; A и B – калибровочные константы.

Датчик скорости воздушного потока и датчик температуры образуют две противоположные ветви моста «Уитстона» (рисунок 8).

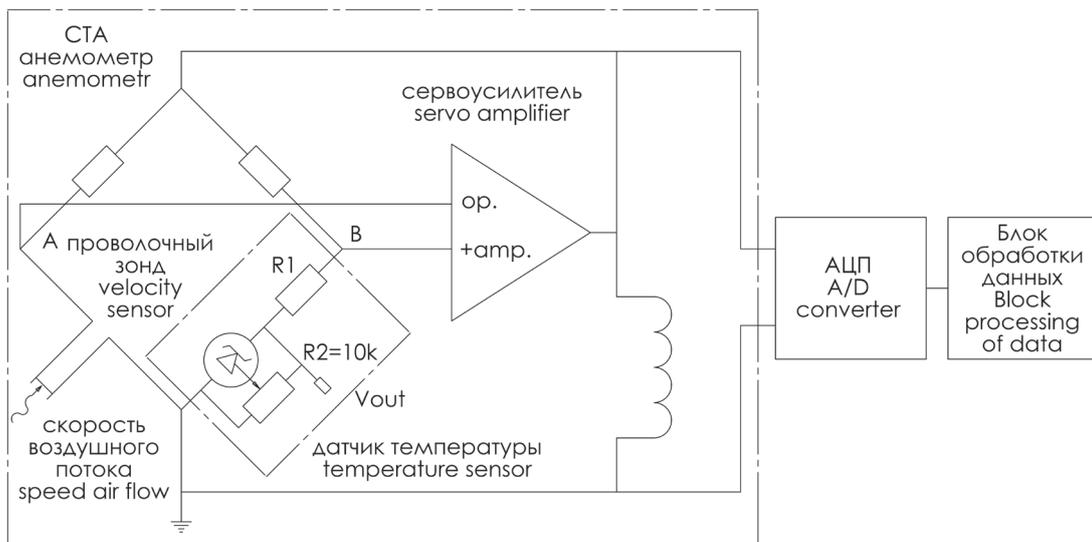


Рисунок 8 – Структурная схема анемометра на базе встроенного датчика температуры

Figure 8 – Structural diagram of an anemometer based on an integrated temperature sensor

Напряжение в точках *A* и *B* выравнивается посредством операционного сервоусилителя. Воздушный поток, проходящий через проволочный зонд, охлаждает датчик скорости и тем самым снижает его сопротивление. Операционный усилитель реагирует сразу же, подавая больше энергии на вершину моста, чтобы поддерживать равновесие напряжения в точках *A* и *B*. Таким образом, мощность, идущая в верхнюю часть моста, связана со скоростью потока воздуха, проходящего через датчик.

В конструкции оптического прицела *DNS-1* анемометр построен базе миниатюрного датчика *Dantec Dynamics* модели 55P11 [9, 10]. В программном пакете *SolidWorks* разработана 3D-модель измерительного узла и в расчетном модуле *Flow Simulation* выполнено моделирование распределения ветровой нагрузки.

В качестве постоянных параметров были заданы: давление 101325 Па (нормальное, СИ) и температура окружающей среды 293,2 К ($\approx 20^\circ\text{C}$). Направление действия ветра выбиралось по оси *Z* и соответствовало скорости -20 м/с [западное (09:00) – восточное (03:00)] и 20 м/с [восточное (03:00) – западное (09:00)]. Сила ветра задавалась дискретно, значения выбирались в середине диапазона по шкале Бофорта: 2 (легкий), 4 (слабый), 7 (умеренный), 12 (сильный), 20 (крепкий) м/с.

В интервале между двумя проволочными зондами (1,25 мм) с шагом 0,06 мм были размещены 20 сенсоров имитирующих длину вольфрамовой проволоки толщиной 5 мкм.

Для повышения точности измерения производилось наложение локальной сетки с минимальным шагом в плоскости размещения сенсоров. По итогам проведения расчетов проводилось усреднение значений скорости ветра с каждого сенсора. Проведена оптимизация формы сквозного окна и корпуса крепления анемометра. Наилучшим конструктивным исполнением являются размеры окна высотой 3,2 мм и шириной 3 мм и скругление кромок радиусом 0,3 мм.

На рисунке 9 представлено распределение полей скорости ветра при аэродинамической продувке узла анемометра со скоростью 20 м/с.

Результаты моделирования показали эффективность пропускания воздушного потока на уровне 20,55 м/с, что соответствует среднему отклонению от заданного исходного параметра в 2,75 %.

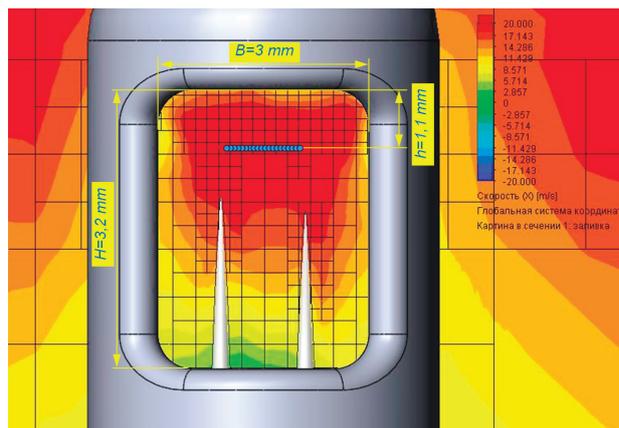


Рисунок 9 – Распределение полей скорости ветра при аэродинамической продувке узла анемометра со скоростью 20 м/с

Figure 9 – Distribution of wind speed fields during aerodynamic blowing of the anemometer assembly at a speed of 20 m/s

Методы измерения угла места цели

Измерение угловых характеристик объекта в пространственном расположении и нахождении его в статическом состоянии осуществляется посредством применения инклинометров на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС). Однако для динамически подвижных объектов показания датчика зависят также от величины ускорений. Поэтому в ряде случаев инклинометр входит в состав комплексных систем измерения, содержащих акселерометры и устройства обработки информации с датчиков. Так, например, в дорогостоящих автоматизированных тепловизионных прицельных комплексах *IWT DEMON* или тепловизионных насадках *IWT NANO* измерение угла места цели осуществляется посредством применения трехосевых гироскопов и акселерометров, установленных на внешнем баллистическом калькуляторе *VAMPIRE SOLO*. Стоимость таких изделий находится на уровне \$12500.

В оптическом прицеле *DNS-1* измерение угла места цели может быть реализовано посредством применения двухосевого датчика, определяющего положение оси прицела в плоскости *XOZ* (см. рисунок 6). Датчик включает пробную массу, к которой подсоединены подвижные электроды, расположенные между двумя неподвижными электродами. Уравновешивание системы обеспечивают пружинные элементы. Когда инклинометр находится строго в горизонтальном

положении, измеряемая емкость между всеми электродами является постоянной. При наклоне пробной массы на угол ε расстояние между подвижными и неподвижными электродами изменяется и датчик фиксирует результирующее значение емкости.

Наибольшая эффективность работы инклинометра проявляется на больших дистанциях,

когда расстояние ОБ до объекта составляет порядка $D = 1000$ м, а высота его размещения ВЦ может быть на уровне 3–6 м (см. рисунок 6). В этом случае угол места цели в среднем находится в пределах $\varepsilon = 0,1719^\circ - 0,3437^\circ (10' - 20')$. Наилучшей чувствительностью обладают датчики моделей *SCA830-D07* или *SCA61T-FA1H1G* (таблица 3).

Таблица 3/Table 3

Основные технические характеристики двухосевых инклинометров

The main technical characteristics of two-axis inclinometers

Наименование параметра Parameter name	SCA830-D07	SCA61T-FA1H1G
Диапазоны измерений Measuring ranges	$\pm 90^\circ$	$\pm 90^\circ$
Предел разрешения измерений Limit of measurement resolution	0,00179°	0,0025°
Напряжение питания Supply voltage	3,3 V	5 V
Стойкость к удару Resistance to shock	20000 g	20000 g
Монтаж SMD Mounting SMD	Да/yes	Нет/no
Габаритные размеры (Д×Ш×В) Overall dimensions (L×H×W)	7,6×3,3×8,6 mm	11,31×5,08×10,48 mm

Из двух рассмотренных вариантов предпочтительным является модель *SCA830-D07*, отличающаяся меньшими габаритными размерами и доступностью технологии поверхностного монтажа *SMD*. Один из вариантов схемы подключения и управления трехосевым инклинометром приведен в работе [11].

Средства визуализации измеренных входных и выходных параметров

Таким образом, баллистический вычислитель включает следующие измерительные модули:

- анемометр *Dantec Dynamics* модели *55P11* – для измерения скорости v_w и направления ветра;
- инклинометр модели *SCA830-D07* – для измерения угла места цели ε ;
- счетчик выстрелов на базе пьезоэлектрического датчика модели *Murata PKGS-00LDP1-R* – для своевременного контроля количества оставшихся боеприпасов в оружии;
- метеостанцию в составе малогабаритного дат-

чика измерения относительной влажности воздуха и температуры модели *SHT21 Sensirion AG* и миниатюрный барометрический пьезорезистивный датчик измерения атмосферного давления модели *BMP280 Bosch Sensortec*;

– экран отображения выходной информации модели *1.44" TFT Serial SPI 128×128 LCD Display Module w/ST7735S* – для точного ввода значений вертикальных и горизонтальных поправок (по количеству кликов) в механизм выверки;

– блок управления и синхронизации параметров на базе микроконтроллеров *ATmega328P* и *Sitronix ST7735S*.

Вариант компоновки измерительного модуля обработки данных как составной части оптического прицела *DNS-1* представлен на рисунке 10. Модуль размещается над окуляром на уровне выходного зрачка. При транспортировке входное окно анемометра закрывается защитным колпачком для предотвращения попадания внутрь посторонних предметов и повреждения проволочного зонда датчика.

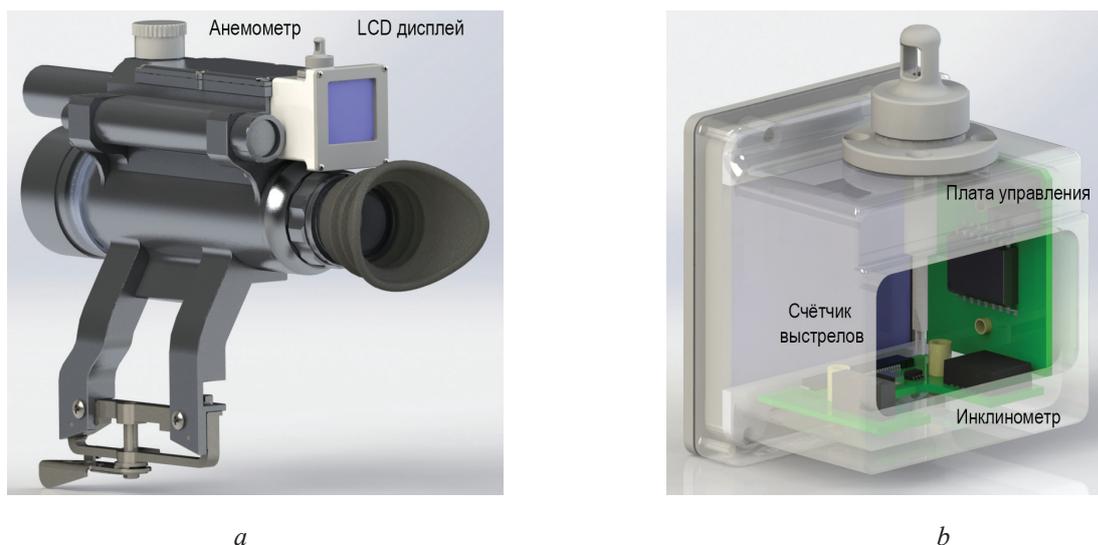


Рисунок 10 – Вариант установки баллистического вычислителя на оптическом прицеле *DNS-1* (а) и внутренняя компоновка измерительных модулей (б)

Figure 10 – The option of installing a ballistic calculator on the optical sight of *DNS-1* (a) and the internal arrangement of the measuring modules (b)

На *LCD* экране отображаются измеренные значения: температуры, атмосферного давления, относительной влажности; скорости ветра v_w и соответствующая ему величина вносимых горизонтальных поправок в кликах на дистанциях 100, 200 и 300 м; измеренное значение угла места цели ε в градусах и соответствующая ему величина вносимых вертикальных поправок в кликах на тех же дистанциях; общее N_{total} и оставшееся N_{rem} количество патронов в магазине оружия (рисунок 11).

T=20°C	P=101 325 Pa	RH=8%
(9→3)	$V_w = 10$ м/с	$\varepsilon = 20^{\circ}10'$
D_{100}:	$n_h = 8$ кл.	$n_v = 0$ кл.
D_{200}:	$n_h = 20$ кл.	$n_v = 0$ кл.
D_{300}:	$n_h = 34$ кл.	$n_v = 1$ кл.
N_{total}	30 bullet	
$N_{rem.}$	20 bullet	

Рисунок 11 – Последовательность отображения выходных данных на экране баллистического вычислителя

Figure 11 – Sequence of output data display on ballistic computer screen

Задача снайпера в конечном итоге сводится к выставлению необходимых значений вертикальных и горизонтальных поправок на бараба-

нах механизмов выверки оптического прицела с учетом выбранной дистанции стрельбы.

Заключение

Рассмотрены различные методы повышения эффективности работы двухканального оптико-электронного прицела посредством анализа степени влияния внешних факторов среды, определяющих траекторию полета пули и точность ее попадания в цель.

Проведена оценка жесткости и устойчивости конструкции двухканального дневно-ночного оптического прицела модели *DNS-1* в двух модификациях элементов крепления на ствольной коробке оружия: по направляющей «ласточкин хвост» и на планке «Пикатинни». В варианте конструкции планка *Picatinny rail* нагрузки составляют меньшую величину и распределяются более равномерно с обеих сторон вдоль линии корпуса прицела.

Проведены расчеты траектории движения пули от патрона 7Н10 калибром 5,45 мм для штурмовой винтовки АК-74Н на дистанциях 300 и 1000 м. Установлено, что на дистанции 300 м и величине превышения 53,2 см баллистический угол (бросания) практически не меняется и находится в пределах $0,2^{\circ}$. Для сверхдальних дистанций до 1000 м баллистический угол возрастает до 3° .

В ходе исследований установлено, что скорость ветра в перпендикулярном направлении направлению выстрела на несколько порядков (до 60 раз) оказывает более существенное влияние на траекторию полета пули по сравнению с попутным или встречным направлением ветра.

Предложен метод измерения ветровой нагрузки с применением теплового анемометра на базе миниатюрного датчика *Dantec Dynamics* модели 55P11. В программном расчетном модуле «*Flow Simulation*» выполнено моделирование ветровой нагрузки и получены распределения полей скорости ветра при аэродинамической продувке узла анемометра в диапазоне от 2 до 20 м/с. Выполнена оптимизация конструкции корпуса анемометра, обеспечившая среднее отклонение заданного воздушного потока от измеренного значения не более 1,5 %.

Предложен метод измерения угла места цели с применением акселерометра на базе двухосевого датчика модели *SCA830-D07*, обеспечивающего точность измерений в пределах 0,00179°. Выполнена общая компоновка баллистического вычислителя интегрированного в оптический прицел *DNS-1*.

Представленные в статье результаты исследований показывают возможность достижения первого этапа по разработке комплексной автоматизированной системы управления огнем для стрелкового оружия. Применение видеоконтрольных устройств для оценки положения потенциальных целей и динамики изменения внешних условий, приемников спутниковой навигации и радиомодемов *WMAN*, устройств для дистанционной активации боя, а также самообучающейся интеллектуальной системы принятия решений позволит в дальнейшем разработать полностью автономную систему управления огнем без участия снайпера.

Список использованных источников

1. Способ стрельбы боевой машины с закрытых позиций по ненаблюдаемой цели и система управления огнем для ее осуществления / ГУП «Конструкторское бюро приборостроения» (г. Тула); И.А. Матвеев, Л.А. Богданова, П.В., Тюрин П.Ю. Миронов, В.А. Малыхин, Л.М. Швец, Н.И. Хохлов, И.В. Степаничев. – Патент RU 2 444 693 C2. – Заявлено: 11.01.2010. – Опубликовано 10.03.2012. – Бюл. № 7.

2. Шипунов, А.Г. Концепция идеального оружия. Вооружение и военная техника / А.Г. Шипунов

[и др.] // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – Вып. 6. – С. 183–195.

3. Teledyne Awarded 25 Million Dollars to Lead in the Development of the Extreme Accuracy Tasked Ordnance (EXACTO) System Teledyne Technologies. Available at: <http://www.defense.gov/contract.aspx?contractid=4377> (accessed 15.10.2010).

4. Boyd, B. Precision guided firearms: disruptive small arms technology / B. Boyd, J. Luper // Proc. SPIE, Display Technologies and Applications for Defense, Security, and Avionics VII. – 2013. – Vol. 8736.

5. Леонов, М.Б. Концептуальная модель охранной системы видеонаблюдения с модулем упреждения опасности / М.Б. Леонов, В.Н. Назаров // ИЗВ. ВУЗОВ. Приборостроение. – 2015. – № 5. – С. 380–384.

6. Данилин, Г.А. Основы проектирования патронов к стрелковому оружию : учебник / Г.А. Данилин, В.П. Огородников, А.Б. Заволокин; Балтийский государственный технический университет. – СПб., 2005. – 374 с.

7. Колосийцев, Л.В. Патроны к стрелковому оружию / Л.В. Колосийцев, И.С. Собакар, В.Т. Никитюк, В.В. Сомов. – Харьков, 2003. – 336 с.

8. Испытания внешнего баллистического калькулятора VAMPIRE SOLO. ЗАО «Инновационные оружейные технологии» (IWT). Available at: <http://inwetechnology.ru/publikaciya-1/> (accessed 23.03.2018).

9. Finn E. Jorgensen. How to measure turbulence with hot-wire anemometers – a practical guide. DANTEC Dynamics / Finn E. Jorgensen. – 2002. – 73 p.

10. Carlos Cesar Aparecido Eguti. Development of a basic circuit of a hot-wire anemometer / Carlos Cesar Aparecido Eguti, Edson Del Rio Vieira // Proceedings of the 10o Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering – ENCIT 2004 – ABCM, Rio de Janeiro, Brazil, Nov. 29 – Dec. 03, 2004. – 9 p.

11. SCA830-D07 1-AXIS INCLINOMETER WITH DIGITAL SPI INTERFACE. Data Sheet. Murata Electronics Oy. Doc. # 82 823 00 D. – 5 p. www.murata.com.

References

1. Matveyev I.A., Bogdanova L.A., Tyurin P.V., Mironov P.Yu., Malykhin V.A., Shvets L.M., Khokhlov N.I., Stepanichev I.V. *Sposob strel'by boevoi mashiny s zakrytykh pozitsii po nenablyudaemoi tseli i sistema upravleniya ognem dlya ee osushchestvleniya* [The method of shooting a combat vehicle from closed positions for an unobserved target and a fire control system for its implementation]. Patent RF 2 444 693 C2 State Unitary Enterprise «Design Bureau of Instrument Engineering» (Tula). Declared: 11.01.2010. Posted on 10.03.2012. Bul. no. 7.

2. Shipunov A.G., Ignatov A.V., Kuznetsov V.M.,

- Gudkov N.V., Ryndin M.V., Tanaev V.P., Dixhev A.I. [The concept of an ideal weapon. Armament and military equipment]. *Proceedings of Tula State University. Technical science*, 2014, is. 6, pp. 183–195 (in Russian).
3. Teledyne Awarded 25 Million Dollars to Lead in the Development of the Extreme Accuracy Tasked Ordnance (EXACTO) System Teledyne Technologies. Available at: <http://www.defense.gov/contract.aspx?contractid=4377> (accessed 15.10.2010).
4. Boyd B., Lupher J. Precision guided firearms: disruptive small arms technology. *Proc. SPIE, Display Technologies and Applications for Defense, Security, and Avionics VII*, 2013, vol. 8736.
5. Leonov M.B., Nazarov V.N. [The conceptual model of the security system of video surveillance with the module of anticipation of danger]. *IZV. VUZOV. Priboroostroenie* [IZV. HIGH SCHOOL. Instrument making], 2015, no. 5, pp. 380–384 (in Russian).
6. Danilin G.A., Ogorodnikov V.P., Zavolokin A.B. *Osnovy proektirovaniya patronov k strelkovomu oruzhiyu* [Basics of designing cartridges for small arms. Textbook], Baltic State Technical University, St. Petersburg, 2005, 374 p. (in Russian).
7. Kolomiitsev L.V., Sobakar I.S., Nikityuk V.T., Somov V.V. *Patrony k strelkovomu oruzhiyu* [Cartridges for small arms]. Kharkiv, 2003, 336 p. (in Russian).
8. Testing of an external ballistic calculator VAMPIRE SOLO. CJSC «Innovative Weapons Technologies»(IWT). Available at: <http://inwetechnology.ru/publikaciya-1/> (accessed 23.03.2018).
9. Finn E. Jorgensen. How to measure turbulence with hot-wire anemometers – a practical guide. DANTEC Dynamics, 2002, 73 p.
10. Carlos Cesar Aparecido Eguti, Edson Del Rio Vieira. Development of a basic circuit of a hot-wire anemometer. *Proceedings of the 10th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering – ENCIT 2004 – ABCM*, Rio de Janeiro, Brazil, Nov. 29 – Dec. 03, 2004, 9 p.
11. SCA830-D07 1-AXIS INCLINOMETER WITH DIGITAL SPI INTERFACE. Data Sheet. Murata Electronics Oy. Doc. # 82 823 00 D, 5 p. Available at: www.murata.com.

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. Объем 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: индекс УДК, название статьи, фамилии авторов (фамилия автора, с которым следует вести переписку, отмечается звездочкой 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 четким. Фотографии представляются в электронном виде (**формат tif, разрешение не менее 300 dpi**). Все рисунки нумеруются и сопровождаются подрисуночными подписями. Фрагменты рисунка обозначаются строчными курсивными латинскими буквами – «a», «b» и т.д. Подписи к рисункам даются на отдельном листе на русском и английском языках. Все сокращения и обозначения на рисунках должны быть расшифрованы в подрисуночной подписи. Надписи на рисунке даются на русском и английском языках.

8. Таблицы не должны дублировать графики. Каждая таблица имеет заголовок. На все таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте. Название и содержание таблиц представляется на русском и английском языках.

9. Обозначения и сокращения, принятые в статье, расшифровываются непосредственно в тексте.

10. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

11. Многострочные формулы должны быть набраны в редакторе MathType, номера формул – по правому краю. Нумеруются лишь формулы, на которые есть ссылки в тексте. 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, символы химических элементов (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).

12. 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 %.

13. Авторы на отдельной странице представляют о себе следующие сведения: фамилия, имя, отчество, ученая степень и звание, место работы и занимаемая должность, адрес электронной связи.

14. Статьи, излагающие результаты исследований, выполненных в учреждениях, должны иметь соответствующее разрешение на опубликование в открытой печати.

15. 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.

16. Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, ранее уже опубликованных или принятых к печати другими изданиями.

17. Статьи, не соответствующие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются и возвращаются авторам. Датой поступления считается день получения редакцией первоначального варианта текста.

18. 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 deciphered.

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.

Индексы:
74835; 748352