

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

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

DEVICES AND METHODS
OF MEASUREMENTS

Том 10

№ 3

Vol. 10

2019

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Научно-технический журнал

Основан в 2010 г.

Учредитель

Белорусский национальный технический университет

Выходит 4 раза в год

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

Том 10

№ 3

2019

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)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

Виба Я., 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)

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

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

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

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

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 лабораторией элионики Института прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко 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 имени А.Н. Севченко Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)
- Кэмп А.**, профессор Института фотоники Страсклайдского университета (г. Глазго, Великобритания)
- Матеос Х.**, к.ф.-м.н., доцент, университет Ровира и Вирхилий (г. Таррагона, Испания)
- Пилипенко В.А.**, член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор, заместитель директора ГЦ «Белмикрoанализ» НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Беларусь)
- Плескачевский Ю.М.**, член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Микро- и нанотехника» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)
- Погребняк А.Д.**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой нанoeлектроники Сумского государственного университета (г. Сумы, Украина)
- Распопов В.Я.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Приборы управления» Тульского государственного университета (г. Тула, Россия)
- Тимчик Г.С.**, д.т.н., профессор, декан приборостроительного факультета, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (г. Киев, Украина)
- Це Ли**, заместитель директора Северо-Восточного НИИ техники датчиков (г. Харбин, КНР)
- Чижик С.А.**, академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор, Первый заместитель Председателя Президиума НАН Беларуси (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

Подписка осуществляется через почтовые отделения связи по «Каталогу газет и журналов Республики Беларусь».

Подписные индексы – 74835; 748352.

Ответственный секретарь редакции: Шахлевич Л.Н.

Редактор: Чабарова О.Л.

Набор и верстка выполнены в редакции журнала «Приборы и методы измерений»

Подписано в печать 30.08.2019. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная.

Гарнитура Times New Roman. Печать цифровая. Усл. печ. л. 9,07. Уч.-изд. л. 3,55. Тираж 140 экз.

Дата выхода в свет 10.09.2019. Заказ № 629.

Отпечатано в Белорусском национальном техническом университете. ЛП № 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 the following databases:
Web of Science Core Collection (ESCI),
EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar,
RISC, Lan, CyberLeninka, Socionet

Volume 10

№ 3

2019

EDITOR-IN-CHIEF

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

Aliaksandr M. Malyarevich, *Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Vice-Rector of Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

Janis Viba, *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)*

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

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

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

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

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

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

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, Rovira i Virgili University (Tarragona, Spain)

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

Yuriy M. Pleskachevsky, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Micro- and Nanotechnics Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

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

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

Gryhoriy S. Tymchyk, Doctor of Science (Engineering), Professor, Dean of the Faculty of Instrumentation Engineering, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

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

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

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

Konstantin V. Yumashev, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Experimental and Theoretical Physics Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

ADDRESS:

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

СОДЕРЖАНИЕ

Средства измерений

*А.В. Будников., Е.И. Шмелев, Д.А. Куликов, А.В. Логинов, С.М. Дмитриев, Н.А. Прибатурин,
П.Д. Лобанов, А.С. Суворов, А.В. Стуленков*

Измерения гидродинамических и вибрационных характеристик для валидации численных расчетов возбуждения конструкций потоком жидкости 223

Д.В. Довкша, С.В. Лешкевич, В.А. Саечников

Разработка внефокусного облучателя на основе фазированной антенной решетки для параболической зеркальной антенны космической связи..... 233

Т.П. Янукович, А.В. Поляков

Моделирование распределенного измерителя силы тока на основе деформации оптического волокна..... 243

Методы измерений, контроля, диагностики

Н.И. Горбачук, Н.А. Поклонский, Я.Н. Марочкина, С.В. Шпаковский

Контроль дифференциального сопротивления p - n -переходов биполярного транзистора в активном режиме методом импедансной спектроскопии..... 253

A.V. Skazochkin, G.G. Bondarenko, P. Żukowski

Research of Surface Wear Resistance of Aluminum Alloy Modified with Minerals using Sclerometry Method..... 263

О.В. Пономарева, А.В. Пономарев, Н.В. Смирнова

Цифровизация измерений спектров в базисе Фурье – тенденции развития и проблемы..... 271

В.Н. Бусько, А.А. Осипов

Применение магнитошумового метода для контроля механической анизотропии ферромагнитных материалов..... 281

CONTENTS

Measuring Instruments

*A.V. Budnikov, E.I. Shmelev, D.A. Kulikov, A.V. Loginov, S.M. Dmitriev, N.A. Pribaturin,
P.D. Lobanov, A.S. Suvorov, A.V. Stulenkov*

**Measurements of the Hydrodynamic and Vibrational Characteristics to Validate Numerical
Calculations of the Structure Excitation by Fluid Flow.....** 223

D.V. Douksha, S.V. Liashkevich, V.A. Saetchnikov

**Development of an out-of-Focus Irradiator Based on a Phased Antenna Array for a Space
Communications' Parabolic Reflector Antenna.....** 233

T.P. Yanukovich, A.V. Polyakov

Simulation of Distributed Current Sensor Based on Optical Fiber Deformation..... 243

Methods of Measurements, Monitoring, Diagnostics

N.I. Gorbachuk, N.A. Poklonski, Ya.N. Marochkina, S.V. Shpakovski

**Controlling of Differential Resistance of $p-n$ -Junctions of Bipolar $p-n-p$ -Transistor in Active
Mode by Method of Impedance Spectroscopy.....** 253

A.V. Skazochkin, G.G. Bondarenko, P. Żukowski

**Research of Surface Wear Resistance of Aluminum Alloy Modified with Minerals
using Sclerometry Method.....** 263

O.V. Ponomareva, A.V. Ponomarev, N.V. Smirnova

**Digitalization of Spectral Measurements in the Fourier Basis – Development Trends
and Problems** 271

V.N. Busko, A.A. Osipov

**Application of Magnetic Noise Method to Control the Mechanical Anisotropy of Ferromagnetic
Materials.....** 281

УДК 621.039.5:532

Измерения гидродинамических и вибрационных характеристик для валидации численных расчетов возбуждения конструкций потоком жидкости

А.В. Будников¹, Е.И. Шмелев¹, Д.А. Куликов¹, А.В. Логинов¹, С.М. Дмитриев²,
Н.А. Прибатурин³, П.Д. Лобанов³, А.С. Суворов⁴, А.В. Стуленков⁴

¹Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро машиностроения имени И.И. Африкантова»,
Бурнаковский проезд, 15, г. Нижний Новгород 603074, Россия

²Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева,
ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород 603950, Россия

³Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук,
пр. Академика Лаврентьева, 1, г. Новосибирск 630090, Россия

⁴Институт прикладной физики Российской академии наук,
ул. Ульянова, 46, г. Нижний Новгород 603950, Россия

Поступила 18.07.2019

Принята к печати 19.08.2019

Вибрация конструкций под воздействием нестационарных гидродинамических сил, обусловленных обтеканием потоком поверхностей конструкций, может неблагоприятно сказываться на прочности и усталостной долговечности. Снижение неблагоприятного воздействия гидродинамических сил в настоящее время становится возможным по результатам связанных трехмерных расчетов гидродинамики (CFD) и вибрации. Однако для адекватного описания в связанной задаче определяющих физических процессов должны использоваться специфические именно для задачи гидроупругих колебаний расчетные модели и подходы. Для обоснования и валидации таких подходов разработана экспериментальная модель и выполнена серия исследований процесса возбуждения конструкции потоком воды.

В качестве конструкции рассматривалась модель, состоящая из двух последовательно установленных цилиндров в поперечном потоке рабочей среды. В процессе испытаний, в зависимости от скорости потока, измерялись уровни вибраций и пульсаций давления в потоке и нестационарных полей скорости. Относительно простая конструкция рассматриваемой модели позволила применить различные бесконтактные системы измерений нестационарных процессов для кроссвалидации получаемых экспериментальных данных и для оценки неопределенностей в процессе испытаний.

На основании полученных данных синхронных измерений анализировалось взаимное влияние потока и динамики конструкции, обусловленное эффектом синхронизации между частотой срыва (или ее гармониками) и собственной частотой цилиндров. Таким образом, выполненные исследования позволили получить информацию одновременно и о динамических характеристиках потока, и о параметрах, характеризующих вибрацию, для случая консольного закрепления стержней.

Полученные экспериментальные данные используются для определения требований к точности проведения численных расчетов гидродинамических сил и для валидации одно- и двусторонне связанных методов численного расчета возбуждений конструкций потоком.

Ключевые слова: валидация, вибрация, *PIV* и *LDV* методы, лазерный виброметр, собственная частота.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-223-232

Адрес для переписки:

А.В. Логинов
Опытное конструкторское бюро машиностроения
имени И.И. Африкантова,
Бурнаковский проезд, 15, г. Нижний Новгород 603074, Россия
e-mail: loginoff.86@gmail.com

Address for correspondence:

A.V. Loginov
Afrikantov OKB Mechanical Engineering,
Burnakovskiy proezd, 15, Nizhnyy Novgorod 603074, Russia
e-mail: loginoff.86@gmail.com

Для цитирования:

А.В. Будников, Е.И. Шмелев, Д.А. Куликов, А.В. Логинов, С.М. Дмитриев,
Н.А. Прибатурин, П.Д. Лобанов, А.С. Суворов, А.В. Стуленков
Измерения гидродинамических и вибрационных характеристик
для валидации численных расчетов возбуждения конструкций
потоком жидкости.

Приборы и методы измерений.

2019. – Т. 10, № 3. – С. 223–232.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-223-232

For citation:

A.V. Budnikov, E.I. Shmelev, D.A. Kulikov, A.V. Loginov, S.M. Dmitriev,
N.A. Pribaturin, P.D. Lobanov, A.S. Suvorov, A.V. Stulenkov
[Measurements of the Hydrodynamic and Vibrational Characteristics
to Validate Numerical Calculations of the Structure Excitation
by Fluid Flow].

Devices and Methods of Measurements.

2019, vol. 10, no. 3, pp. 223–232 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-223-232

Measurements of the Hydrodynamic and Vibrational Characteristics to Validate Numerical Calculations of the Structure Excitation by Fluid Flow

A.V. Budnikov¹, E.I. Shmelev¹, D.A. Kulikov¹, A.V. Loginov¹, S.M. Dmitriev², N.A. Pribaturin³, P.D. Lobanov³, A.S. Suvorov⁴, A.V. Stulenkov⁴

¹Joint Stock Company, "Afrikantov OKB Mechanical Engineering",
Burnakovsky proezd, 15, Nizhny Novgorod 603074, Russia

²R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University,
Minin str., 24, Nizhny Novgorod 603950, Russia

³S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Division of the Russian Academy of Sciences,
Akademicheskaya Lavrentiev Ave., 1, Novosibirsk 630090, Russia

⁴Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,
Ul'yanov str., 46, Nizhny Novgorod 603950, Russia

Received 18.07.2019

Accepted for publication 19.08.2019

Abstract

Structure vibration under the influence of unsteady hydrodynamic forces caused by the flow around their surfaces can adversely affect durability and rupture life. Reducing the adverse effects of hydrodynamic forces is currently possible with the help of linked *CFD* and vibration calculations. However, for an adequate description of the associated processes one should use calculation models and approaches specific to the hydro-vibration problem. To justify and validate such approaches, an experimental model was developed and a series of structure excitation tests in water flow was carried out.

The model comprises two cylinders installed sequentially in water crossflow. Vibration levels, pressure and velocity fluctuations were measured in the tests as a functions of the flow velocity. The application of different non-intrusive measurement techniques was possible due to relatively simple test model construction which may be used for cross-validation and experimental uncertainty quantification.

Flow-structure interaction, caused by synchronization effect of the flow separation frequency (or its spectral components) and eigenfrequency of cylinder, was analyzed based on simultaneously measured data. The tests performed gave the information about dynamical characteristics of the flow and vibration parameters of cantilevered cylinders. The experimental results are used for identification of required accuracy of hydrodynamic forces calculation by *CFD* and validation of one- and two-way linked methods for flow excitation frequency calculation.

Keywords: validation, vibration, *PIV*, *LDV*, laser vibration meter, eigenfrequency.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-223-232

Адрес для переписки:

А.В. Логинов
Опытное конструкторское бюро машиностроения
имени И.И. Африкантова,
Бурнаковский проезд, 15, г. Нижний Новгород 603074, Россия
e-mail: loginoff.86@gmail.com

Address for correspondence:

A.V. Loginov
Afrikantov OKB Mechanical Engineering,
Burnakovsky proezd, 15, Nizhny Novgorod 603074, Russia
e-mail: loginoff.86@gmail.com

Для цитирования:

А.В. Будников, Е.И. Шмелев, Д.А. Куликов, А.В. Логинов, С.М. Дмитриев,
Н.А. Прибатурин, П.Д. Лобанов, А.С. Суворов, А.В. Стуленков
Измерения гидродинамических и вибрационных характеристик
для валидации численных расчетов возбуждения конструкций
поток жидкости.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 3. – С. 223–232.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-223-232

For citation:

A.V. Budnikov, E.I. Shmelev, D.A. Kulikov, A.V. Loginov, S.M. Dmitriev,
N.A. Pribaturin, P.D. Lobanov, A.S. Suvorov, A.V. Stulenkov
[Measurements of the Hydrodynamic and Vibrational Characteristics
to Validate Numerical Calculations of the Structure Excitation
by Fluid Flow].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 3, pp. 223–232 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-223-232

Введение

Гидродинамические силы, возникающие при обтекании потоком теплоносителя поверхностей конструкций, приводят к вибрации конструкций. Вибрационные нагрузки, возбуждаемые потоком теплоносителя, сопровождаются такими проблемами, как фреттинг-износ, усталостное нагружение U -трубок парогенераторов и теплообменного оборудования. В ряде случаев подобные нагрузки, неблагоприятно сказываясь на прочности и усталостной долговечности конструкции, в конечном счете, могут привести к ее разрушению. Как правило, случаи разрушения конструкций подробно анализируются и описываются, см., например, [1–3].

Оценки виброн нагружения конструкций потоком теплоносителя могут быть выполнены путем решения связанной трехмерной задачи гидродинамики и динамики конструкции. Применение связанных вычислений позволяет на качественно новом уровне оптимизировать на этапе проектирования конструкцию для обеспечения улучшенных ресурсных характеристик элементов оборудования. Связанные вычисления для анализа вибрации обладают рядом специфических требований к гидродинамическому расчету. В частности, гидродинамический (CFD) расчет должен разрешать силы, действующие не только на гидродинамической частоте, но и силы на собственной частоте конструкции. Кроме того, в случае больших перемещений конструкции под действием потока (возникающих, например, при синхронизации) моделирование гидродинамики должно учитывать данные перемещения путем решения двусторонне связанной задачи гидродинамики потока и колебаний конструкции. Сложность вычислений определяется проблемой разделения пульсаций гидродинамической силы от численных ошибок в расчетах и физической неустойчивости, обусловленных характером течения. В этой связи разработка рекомендаций по проведению связанных расчетов представляется актуальной задачей.

Важным этапом решения связанной задачи является этап валидации результатов численного расчета по экспериментальным данным. Для экспериментальной проверки взаимного влияния процессов обтекания и процессов колебания тела должны быть предусмотрены соответствующие методы контроля. Следует отметить, что экспе-

риментальным и теоретическим исследованиям вибраций плохообтекаемых тел, возбуждаемых потоком, посвящено достаточно много работ. Подробный обзор данной проблематики приводится, например, в монографиях [4–7]. При этом информация о результатах совместных измерений вибрации и гидродинамических параметров потока, которые можно было бы использовать для валидации численных расчетов трубных пучков, крайне ограничена.

Следует отметить работу [8], в которой исследуется возбуждение цилиндров при поперечном обтекании потоком для валидации метода расчета гидроупругого взаимодействия. Авторы приводят результаты измерений как гидродинамики потока, так и перемещения для одного из цилиндров. При данных испытаниях исследуемый цилиндр был жестким и имел подвижное закрепление. Перемещения цилиндра оценивались на основе показаний тензорезисторов, установленных в районе заделки. Подобный подход делает затруднительным валидацию изгибных форм колебаний конструкции.

В работе [9] акцент делается на исследованиях гидродинамики течения в трубном пучке различными методами: *PIV* – *Particle Image Velocimetry* (анемометрия по изображениям частиц); *LDV* – *Laser Doppler Velocimetry* (лазерная доплеровская анемометрия) и другими. Измерения вибрации при данных испытаниях не проводились. С учетом перечисленных факторов, представляется актуальной задача одновременного получения экспериментальных данных, содержащих спектральные характеристики вибрации и гидродинамики потока для плохообтекаемых конструкций.

В статье приведены результаты экспериментальных исследований возбуждения вертикальных металлических стержней поперечным потоком воды для случая консольного закрепления стержней. Спецификой выполненных исследований является одновременное измерение динамических характеристик потока и параметров, характеризующих вибрацию. Относительно простая конструкция экспериментальной модели позволила использовать набор бесконтактных систем измерений полей параметров, что обеспечило представительность полученных экспериментальных данных для валидации программ трехмерного расчета гидродинамики и вибрации.

Описание стенда и исследуемой модели

Для валидации связанных расчетов гидродинамики и вибрации рассматривается модель, состоящая из двух последовательно установленных цилиндров в поперечном потоке рабочей среды (рисунок 1). Два цилиндра в поперечном потоке являются простейшим вариантом для описания течения в трубном пучке, который широко исследуется на протяжении последних десятилетий (один из последних обзоров приведен в работе [10]).

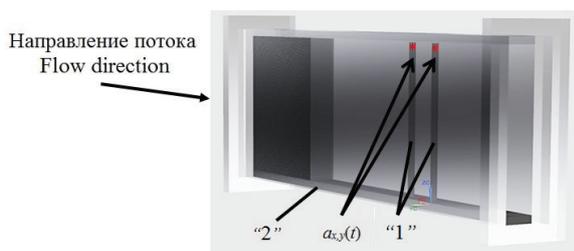


Рисунок 1 – 3D модель канала с цилиндрами в поперечном потоке. Расположение точек измерений вибрации

Figure 1 – 3D model of the channel with two in-line cylinders in the cross flow. Locations of vibration measurements

Основным гидродинамическим процессом при поперечном обтекании цилиндра является дорожка Кармана, характеризующаяся частотой срыва вихрей с поверхности цилиндров f_s . Процесс обтекания сопровождается возбуждением конструкции на частоте срыва f_s , а также на ее собственных частотах f_n . Основные размеры модели и ее жесткостные характеристики выбраны таким образом, чтобы появилась возможность исследовать режимы течения как до синхронизации частоты срыва (или ее гармоник) с собственной частотой конструкции, так и режим с синхронизацией.

Цилиндры «1» в модели имеют консольное закрепление и располагаются соосно. Модель цилиндра отличается от моделей, приведенных в [10], где рассматриваются модели жестких цилиндров. Консольное закрепление цилиндра по отношению к жесткому варианту позволяет снизить значение собственной частоты f_n , что делает возможным исследовать пульсации скорости лазерными методами в частотном диапазоне в области f_n .

Длина цилиндров равна 200 мм. Расстояние между цилиндрами составляет порядка $6d$ (где

d – диаметр цилиндра). Рассматриваемые цилиндры выполнены из металлической тонкостенной трубки. Цилиндры «1» размещаются в прямоугольном канале «2» (рисунок 1) циркуляционной трассы стенда, через которую организован поток рабочей среды (вода при комнатной температуре). Нижняя стенка канала выполнена из стали, а верхняя и боковые стенки канала – из оргстекла. В канале испытываемые цилиндры жестко закреплены снизу, а верхний конец цилиндров свободен. Канал спроектирован таким образом, что его собственные частоты были намного выше, чем первые собственные частоты цилиндров. В целом, конструкция канала с плохообтекаемыми телами оптимизирована для последующего расчетного моделирования гидродинамических и механических процессов.

Принципиальная схема стенда изображена на рисунке 2. Изменение скорости потока на входе в канал в диапазоне от 0,3 до 2 м/с обеспечивается за счет изменения частоты вращения насоса. Число Рейнольдса Re , вычисленное исходя из диаметра цилиндров и скорости потока на входе в канал, варьируется от 10^3 до 10^4 . В ходе экспериментов измеряются значения статического давления и температуры с погрешностями $\pm 0,006$ кгс/см² и $\pm 0,25$ °С соответственно.

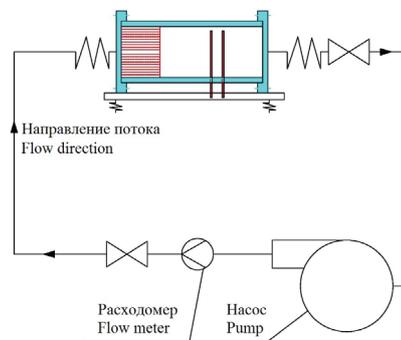


Рисунок 2 – Принципиальная схема стенда

Figure 2 – The schematic diagram of the test facility

Системы измерений

Различные системы измерений пульсаций скорости и давления, а также измерений вибрации используются для исследования нестационарных параметров потока и колебаний цилиндров.

Во внутренних полостях цилиндров расположены миниатюрные акселерометры, применяемые для измерения вибрации тела. Акселерометры располагаются в верхней части

цилиндров и позволяют измерять виброускорение $a_{x,y}(t)$ в двух взаимно перпендикулярных направлениях (рисунок 1). Как следствие, обеспечена возможность одновременных измерений колебаний цилиндров и нестационарных полей скорости вблизи тел. В процессе измерений контролируется уровень вибрации канала.

Исследования гидродинамики течения осуществляются *PIV* методом. Применяются системы на основе импульсного лазера *LaVision* с лазером *NANO L PIV 135-15*, а также непрерывного лазера *DTL-413* с высокоскоростной камерой *Fastec HiSpec 5*. В качестве частиц-трассеров используются полиамидные частички размером 10–30 мкм. Измерения скорости осуществляются в вертикальной $v(z)$ и горизонтальной $v(x)$ плоскостях перед первым и вторым цилиндрами, а также после второго цилиндра. Работоспособность метода *PIV* в условиях описанной модели подтверждена путем дублирования измерений скорости методом *LDV*. Для проведения исследований использована лазерная доплеровская измерительная система ЛАД-05 производства ИТ СО РАН. Помимо *PIV* и *LDV* измерений скорости измеряются пульсации давления $p_{1,2}(t)$ с использованием датчика *PCB 106B52* на стенке канала по высоте в среднем сечении. На рисунке 3 изображены точки измерений пульсаций скорости и давления.

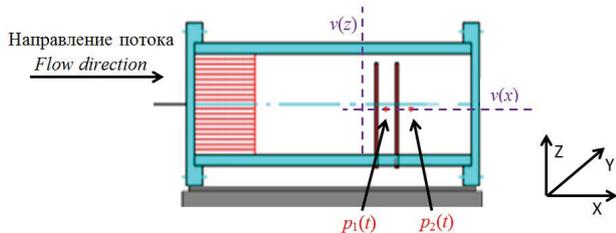


Рисунок 3 – Расположение точек измерения пульсаций скорости и давления

Figure 3 – Locations of velocity and pressure pulsations measurements

Тестирование работоспособности датчиков вибрации и пульсаций давления выполнено путем дублирования измерений с помощью сканирующего трехкомпонентного лазерного виброметра и гидрофонов 8103 *B&K* соответственно в условиях синхронизации съема информации используемыми системами. Это обеспечило возможность кроссвалидации и оценки неопределенностей получаемых экспериментальных данных.

Результаты измерений

Измерения проведены для различных скоростей потока. По временной реализации измеренных параметров вычислена спектральная плотность мощности (далее спектр).

Определение граничных и начальных условий

Определение граничных и начальных условий является необходимым этапом проведения испытаний, способным существенным образом повлиять на точность валидации нестационарных процессов в дальнейшем.

С точки зрения моделирования гидродинамических процессов важным аспектом является измерение фактического профиля скорости на входе в канал. Измерения выполнены *PIV* методом с использованием импульсного лазера. На рисунке 4 приводятся профили скорости в вертикальном сечении перед цилиндрами для различных расходов рабочей жидкости. Как следует из рисунка, профиль потока практически по всей высоте канала достаточно близок к равномерному при скоростях до 0,8 м/с. Наблюдаемые отклонения вблизи стенки отчасти связаны с ограничениями *PIV* метода при визуализации потока в пристеночном слое. Корректность полученных данных подтверждается профилями скорости, полученными при помощи метода *LDV*. Сравнение профилей скорости, полученных разными методами, приведено на рисунке 5.

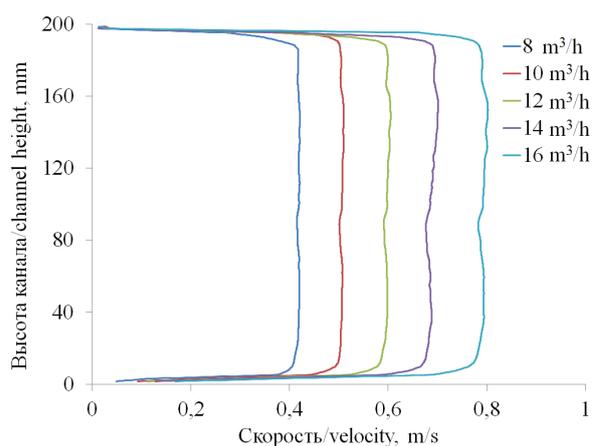


Рисунок 4 – Профили скорости в вертикальном сечении перед первым цилиндром, полученные *PIV* методом

Figure 4 – The velocity profiles in the vertical section before the 1st cylinder

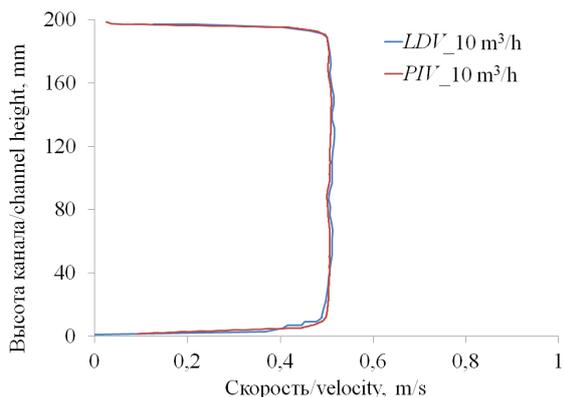


Рисунок 5 – Профили скорости в вертикальном сечении перед первым цилиндром, полученные методами *PIV* и *LDV*

Figure 5 – The velocity profiles in the vertical section before the 1st cylinder measured by *PIV* and *LDV* methods

Для учета условий установки цилиндров в канал выполнен анализ виброотклика цилиндров при искусственном ударном возбуждении корпуса модели. Такие параметры как демпфирование в системе, жесткость закрепления цилиндров в канале являются определяющими при разработке структурной модели и способны повлиять на значение собственной частоты и амплитуды колебаний цилиндров. Данные параметры в процессе испытаний вычислены на базе измерений передаточных функций отклика конструкции на точечное искусственное возбуждение. На рисунке 6 приводится спектр передаточной функции виброотклика цилиндров в канале с водой. Значение первой собственной частоты первого и второго цилиндров составило 98 и 88 Гц соответственно. Коэффициент демпфирования цилиндров составил $\eta = 0,01$, присоединенная масса для цилиндров равна 1,1.

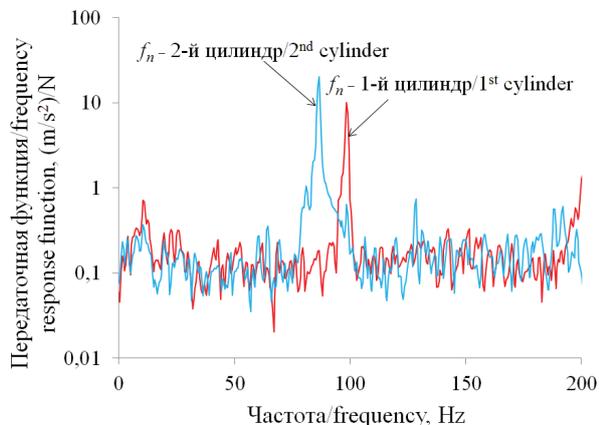


Рисунок 6 – Передаточная функция виброотклика цилиндров при искусственном возбуждении корпуса модели

Figure 6 – Frequency response function for the 1st and 2nd cylinders under the impact excitation of the channel

Измерение гидродинамических характеристик потока

LDV метод дает возможность определить помимо усредненного поля скорости также и временные зависимости. На рисунке 7 приводятся графики со спектрами пульсаций скорости в непосредственной близости от цилиндров. Можно отметить, что значения срывной частоты, полученные экспериментальным способом, хорошо коррелируют с аналитическим решением. В частности, при расходе $8 \text{ м}^3/\text{ч}$ аналитическое значение $f_s = 14,4 \text{ Гц}$ при $St = 0,2$, при этом по спектрам для первого цилиндра $f_s = 15 \text{ Гц}$. Для второго цилиндра срывная частота не так явно выделяется на фоне непрерывной части спектра. В целом, увеличение скорости сопровождается пропорциональным увеличением частоты срыва, а также увеличением амплитуды пульсаций скорости.

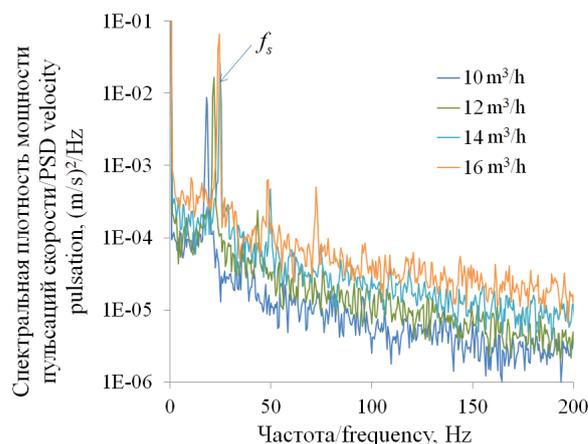


Рисунок 7 – Спектры пульсаций скорости для различных расходов между цилиндрами

Figure 7 – The velocity pulsation spectra for the different flow rates after the first cylinder

Пульсационная составляющая скорости также может быть оценена *PIV* методом на базе непрерывного лазера. Данный метод является аналогом высокочастотных *PIV* систем на базе импульсного лазера. На одном из режимов проведено сравнение измерения спектра пульсации скорости вблизи первого цилиндра методами *PIV* и *LDV* (рисунок 8). Отличие амплитуды на срывной частоте составило менее 10 %.

Следует отметить, что течения в диапазоне $8\text{--}14 \text{ м}^3/\text{ч}$ являются режимами до синхронизации. По мере приближения срывной частоты или ее гармоник к собственной частоте кон-

струкции наблюдается эффект синхронизации. Синхронизация сопровождается резким увеличением уровней вибрации, изменением спектрального состава сил, а также взаимной подстройкой частоты срыва и собственной частоты [4, 9].

Для первого цилиндра при поперечном обтекании синхронизация обусловлена совпадением гармоники частоты срыва с собственной частотой и наблюдается при расходе $16 \text{ м}^3/\text{ч}$. Взаимная подстройка частоты срыва и собственной частоты достигает 1 Гц. При этом увеличение скорости не сопровождается увеличением частоты срыва, характерным в режимах до синхронизации. В режиме синхронизации в спектре пульсаций давления (рисунок 9) появляется пик на частоте, равной собственной частоте цилиндра, и гармонический ряд, связанный с данным процессом. В спектрах пульсаций скорости, полученных с помощью методов *PIV* и *LDV*, также можно идентифицировать собственную частоту цилиндра. В свою очередь в диапазоне расхода до $20 \text{ м}^3/\text{ч}$ перевести второй цилиндр в режим синхронизации не удалось. Применение различных систем позволило детально исследовать механизм возникновения синхронизации. Следует отметить, что метод *LDV* имеет большую чувствительность при регистрации пульсаций скорости по сравнению с *PIV* методом. Это позволяет, используя *LDV* метод, идентифицировать в спектрах пульсаций скорости собственную частоту даже на режимах до синхронизации.

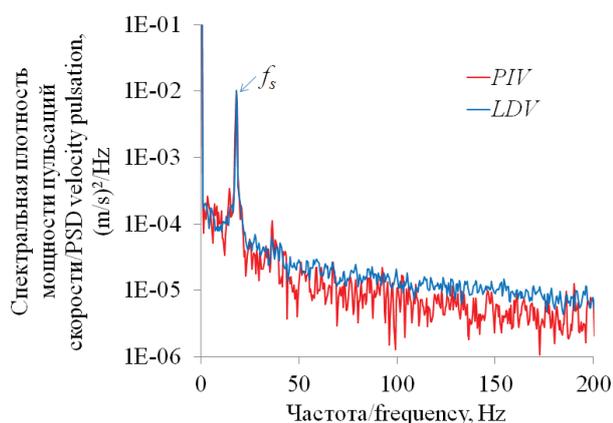


Рисунок 8 – Спектры пульсаций скорости, полученные методами *PIV* и *LDV*

Figure 8 – Pressure pulsation spectra measured by *PIV* and *LDV* methods

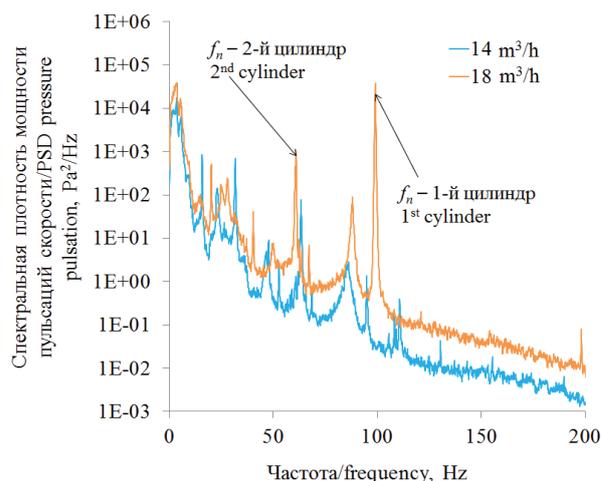


Рисунок 9 – Спектры пульсации давления для расходов $14 \text{ м}^3/\text{ч}$ (до режима синхронизации) и $18 \text{ м}^3/\text{ч}$ (в режиме синхронизации)

Figure 9 – Pressure pulsation spectra for the $14 \text{ м}^3/\text{ч}$ (before lock-in) and $18 \text{ м}^3/\text{ч}$ (the lock-in mode) flow rates

Измерение вибрационных характеристик цилиндров

Измерения вибрационных характеристик цилиндров, возбуждаемых потоком, выполнено синхронно с измерением гидродинамических характеристик. В качестве примера на рисунке 10 приведены узкополосные спектры виброускорений цилиндров для продольного направления в зависимости от расхода рабочей среды. На спектрах можно выделить на фоне широкополосной части частоты срыва f_s и собственные частоты f_n цилиндров. Данные характеристики получены с использованием акселерометров. Погрешность измерений в диапазоне частот от 5 до 200 Гц не превышала 20 %.

Для более детального анализа рассматриваются зависимости вибрации от расхода рабочей среды на срывной частоте и собственной частоте цилиндров. Здесь амплитуда вибрации определена с учетом колебаний цилиндров как в поперечном, так и продольном направлениях. Соответствующие зависимости приводятся на рисунке 11. Как следует из графиков, по мере увеличения расхода амплитуда вибрации на срывной и собственных частотах увеличивается. Данные зависимости целесообразно использовать для количественного сравнения численных значений и результатов измерений. Следует отметить, что по мере увеличения скорости также меняется коэффициент демпфирования в системе [11, 12]. В режиме до синхронизации существенного вли-

яния скорости потока на коэффициент демпфирования η не выявлено. В свою очередь, режим синхронизации сопровождается существенным уменьшением демпфирования в системе до 0,002.

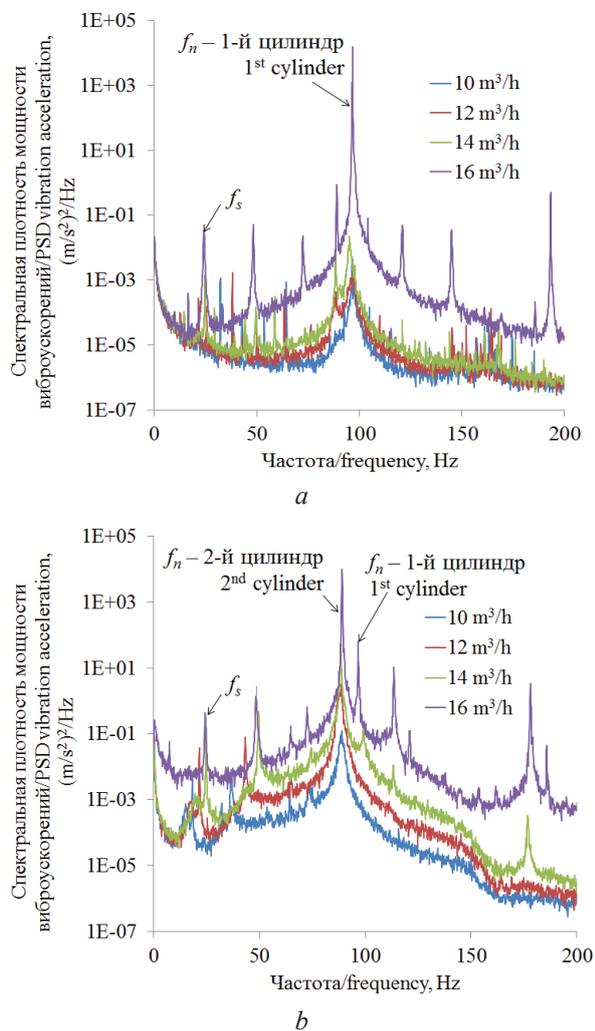


Рисунок 10 – Спектры виброускорений для 1-го (a) и 2-го (b) цилиндров в продольном направлении в зависимости от расхода рабочей среды

Figure 10 – Vibration acceleration level spectra for the 1st (a) and 2nd (b) cylinders for the different flow rates for the transverse direction

На рисунке 12 приведены спектры виброускорений, полученные с помощью лазерного виброметра и акселерометров на одном из режимов течения. Разница по результатам измерений вибрации не превышает 40 % на частоте срыва и собственной частоте цилиндров. В частотном диапазоне ниже 10 Гц при измерениях лазерным виброметром установлен ВЧ фильтр. Необходимо отметить, что гидродинамическая сила, возбуждающая цилиндры и обусловленная срывом вихрей, имеет квазислучайную природу.

Измерение такого рода сигналов лазерным виброметром требовало усреднения большого числа выборок для минимизации влияния всплесков, вызванных остаточными пузырьками воздуха и примесями в воде. С учетом погрешностей измерений наблюдаемые отличия вычислений виброускорений свидетельствует о достаточно хорошей сходимости экспериментальных данных. Синхронность измерений обеспечена за счет внешнего триггера.

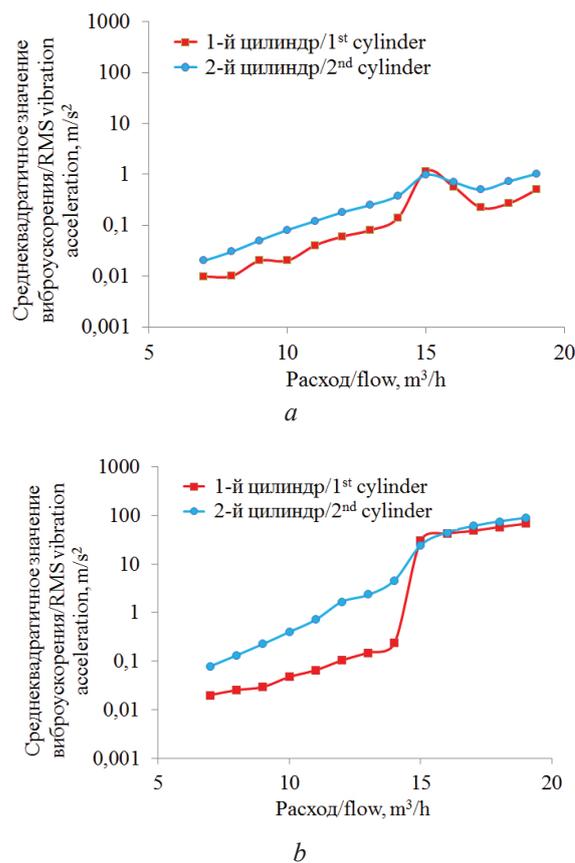


Рисунок 11 – Зависимости вибрации от расхода на срывной (a) и собственной частотах (b) цилиндров

Figure 11 – Cylinders vibration acceleration as a function of the flow rate at the shedding frequency (a) and the natural frequency (b)

Сканирующий лазерный виброметр позволил измерить через воду вибрацию цилиндров в нескольких точках по высоте. Это позволило оценить форму колебания цилиндров под действием потока на частоте срыва и собственной частоте. Форма колебаний цилиндров имеет преимущественно изгибный характер по отношению к точке закрепления. На рисунке 13 изображены формы колебаний цилиндров для собственной частоты.

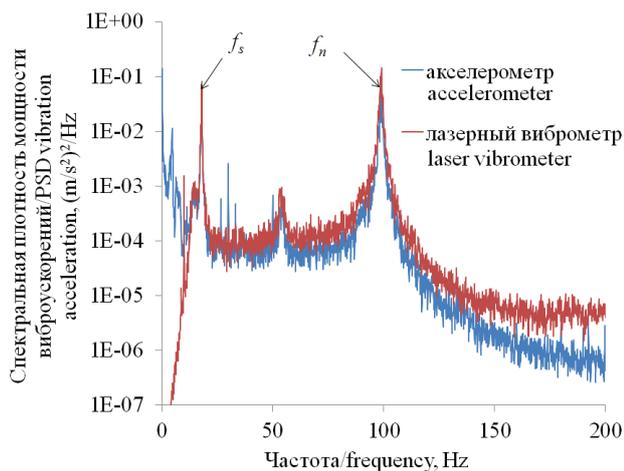


Рисунок 12 – Спектры виброускорений цилиндра, полученные с помощью лазерного виброметра и акселерометров

Figure 12 – Vibration acceleration spectra obtained by a laser vibrometer and accelerometers

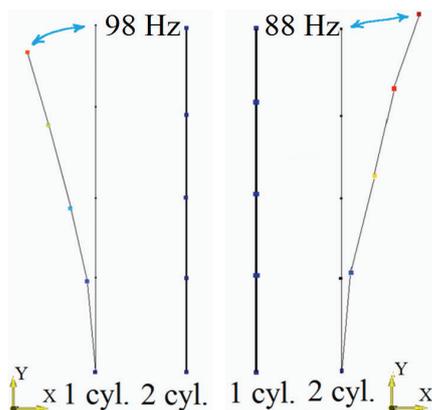


Рисунок 13 – Формы колебаний цилиндров на собственной частоте под действием потока

Figure 13 – Shape of cylinders oscillations at the natural frequency induced by the flow

Полученную информацию о динамических характеристиках цилиндров, возбуждаемых потоком, в дальнейшем планируется использовать для валидации связанных численных расчетов колебаний конструкции на гидродинамическое возбуждение.

Заключение

Представлены результаты применения различных систем измерения для определения взаимного влияния нестационарных гидродинамических сил и вызванных этими силами колебаний конструкции. Используется эксперименталь-

ная модель, состоящая из двух последовательно установленных цилиндров в поперечном потоке рабочей среды.

В процессе испытаний выполнены измерения уровней вибрации цилиндров и пульсаций давления в зависимости от скорости потока. Конструкция рассматриваемой модели позволила применить различные бесконтактные системы измерений нестационарных процессов для кросс-валидации получаемых экспериментальных данных и для оценки неопределенностей.

Впервые получены экспериментальные данные о взаимном влиянии гидродинамики потока и динамики конструкции, обусловленные эффектом синхронизации между частотой срыва (или ее гармониками) и собственной частотой, для случая консольного закрепления цилиндров.

Отличие амплитуды пульсаций скорости на срывной частоте, измеренной методом анемометрии по изображениям частиц и методом лазерной доплеровской анемометрии, составило менее 10 %. Синхронные измерения вибрации акселерометрами и лазерным виброметром показали, что точность измерений вибрации составляет 40 %.

Полученные экспериментальные данные в дальнейшем планируется использовать для определения требований к точности проведения численных расчетов гидродинамических сил и для валидации одно- и двусторонне связанных методов численного расчета возбуждений конструкций потоком.

References

1. Pettigrew M., Taylor C., Fisher N., Yetisir M., Smith B.A.W. Flow-induced vibration: recent findings and open questions. *Nuclear Engineering and Design*, 1998, vol. 185, pp. 249–276. DOI: 10.1016/S0029-5493(98)00238-6
2. Shin Y.S., Wambsganss M.W. Flow-induced vibration in Imfbr steam generators: a state-of-the-art review. *Nuclear Engineering and Design*, 1977, vol. 40, iss. 2, pp. 235–284. DOI: 10.1016/0029-5493(77)90038-3
3. Paidoussis M. Real-life experiences with flow-induced vibration. *Journal of Fluids and Structures*, 2006, vol. 22, iss. 6–7, pp. 741–755. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2006.04.002
4. Kaneko S., Nakamura T., Inada F. Flow-Induced Vibrations Classifications and Lessons from Practical Experiences. Elsevier, *Second Edition*, 2014, 410 p.
5. Paidoussis M.P. Fluid-structure interactions: slender structure interactions and axial flow. *Academic press*, 1998, vol. 1, 572 p.

6. Paidoussis M.P. Fluid-structure interactions: slender structure interactions and axial flow. Academic press, 2004, vol. 2, 888 p.
7. Devnin S.I. Fluid elasticity of structures in the detached flow. Sudostroenie, St. Petersburg, Russia, 1975, 184 p.
8. Shinde V. Fluidelastic instability in heat exchanger tube arrays and a Galerkin-free model reduction of multiphysics systems. *Engineering Sciences (physics). Ecole Polytechnique*, 2015, 207 p.
DOI: 10.13140/RG.2.1.2349.5761
9. William J., Fichet V., Goreaud N. Advanced comparison of CFD Fluent code with experimental data on a transverse flow across rod bundle using LDV, PIV, Optical Flow and POD, 23 Congrès Français de Mécanique, Lille, 2017, 24 p.
10. Sumner D. Two circular cylinders in cross-flow: A review. *Journal of Fluids and Structures*, 2010, vol. 26, iss. 6, pp. 849–899.
DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2010.07.001
11. Chen S.S., Jendrzejczyk J.A. Flow velocity dependence of damping in tube arrays subjected to liquid cross flow. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1981, vol 103, pp. 130–135. **DOI:** 10.1115/1.3263377
12. Pettigrew M.J., Rogers R.J., Axisa F. Damping of Heat Exchanger Tubes in Liquids: Review and Design Guidelines. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2011, vol. 133, iss. 1, 014002, pages 11. **DOI:** 10.1115/1.4000711

УДК 621.396.67

Разработка внефокусного облучателя на основе фазированной антенной решетки для параболической зеркальной антенны космической связи

Д.В. Довкша, С.В. Лешкевич, В.А. Саечников

Белорусский государственный университет,
ул. Курчатова, 5, г. Минск 220064, Беларусь

Поступила 06.06.2019

Принята к печати 05.08.2019

В настоящее время в системах спутниковой и космической связи и радиоастрономии широко используются зеркальные антенные системы. Развитие данных отраслей требует разработки новых эффективных антенных систем. Возможным техническим решением для создания эффективной зеркальной антенны является «гибридная» схема, когда адаптивная фазированная антенная решетка используется в качестве облучателя. Данная работа посвящена разработке внефокусного облучателя на основе фазированной антенной решетки для параболической зеркальной антенны космической связи. Целью работы являлась разработка оптимальной конструкции облучателя с выбором элемента решетки и проведением экспериментальных исследований выбранного конструктивного элемента.

В качестве инструмента выбора конфигурации облучателя использован метод восстановления волнового фронта. Идея его использования заключается в воспроизведении облучателем электромагнитного поля падающей плоской волны с целью равномерного засвета апертуры зеркала антенны.

Для выбора конструктивного элемента облучателя рассмотрены несколько антенн: патч-антенна, плоская спиральная антенна, коническая спиральная антенна. Определены требования к элементу фазированной антенной решетки. Проведено моделирование облучателя на основе перечисленных конструктивных элементов и проведена оптимизация геометрии облучателя по критерию максимального усиления.

Максимальное усиление достигнуто конструкцией облучателя на основе конических спиральных антенн и составило 30,8 дБ, что для рассматриваемого раскрытия зеркала 2,4 м близко к традиционным фокусным схемам. Полученные результаты позволяют создать адаптивную антенную систему с возможностью компенсировать отклонения формы зеркала от теоретического профиля, а также фазовые искажения в атмосфере изменением весовых коэффициентов решетки.

Ключевые слова: параболическая зеркальная антенна, фазированная антенная решетка, метод восстановления волнового фронта, патч-антенна, спиральная антенна.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-233-242

Адрес для переписки:

Д.В. Довкша
Белорусский государственный университет,
ул. Курчатова, 5, г. Минск 220064, Беларусь
e-mail: d.dovksha@gmail.com

Address for correspondence:

D.V. Douksha
Belarusian State University,
Kurchatova str., 5, Minsk 220045, Belarus
e-mail: d.dovksha@gmail.com

Для цитирования:

Д.В. Довкша, С.В. Лешкевич, В.А. Саечников
Разработка внефокусного облучателя на основе фазированной антенной решетки для параболической зеркальной антенны космической связи.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 3. – С. 233–242.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-233-242

For citation:

D.V. Douksha, S.V. Liashkevich, V.A. Saetchnikov
[Development of an out-of-Focus Irradiator Based on a Phased Antenna Array for a Space Communications' Parabolic Reflector Antenna].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 3, pp. 233–242 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-233-242

Development of an out-of-Focus Irradiator Based on a Phased Antenna Array for a Space Communications' Parabolic Reflector Antenna

D.V. Douksha, S.V. Liashkevich, V.A. Saetchnikov

Belarusian State University,
Kurchatova str., 5, Minsk 220045, Belarus

Received 06.06.2019

Accepted for publication 05.08.2019

Abstract

Mirror antenna systems are widely used in satellite and space communication systems and radio astronomy. Development of these areas requires new efficient antenna systems' design. Possible technical solution for creating an effective mirror antenna is a “hybrid” scheme, when an adaptive phased antenna array is used as an irradiator. This paper is devoted to the development of an out-of-focus irradiator based on a phased antenna array for a space communications' parabolic reflector antenna. The aim of the work is to develop an optimal design of the irradiator with the choice of the structural element of the antenna array and experimental studies of the selected structural element.

The wavefront recovery method was used as a tool for selecting the irradiator configuration. The idea of this method use is to reproduce the electromagnetic field of an incident plane wave with an irradiator in order to uniformly illuminate the aperture of the antenna mirror.

In order to select the structural element of the irradiator several antennas were considered: a patch antenna, a flat spiral antenna, a conical spiral antenna. The requirements for the phased antenna array element were defined. The irradiator based on the above mentioned was simulated and the irradiator geometry was optimized according to the maximum gain criterion.

The maximum gain was achieved for the irradiator based on conical spiral antennas and amounted to 30.8 dB, which for the considered mirror aperture of 2.4 m is close to traditional focal schemes. The results obtained make it possible to create an adaptive antenna system able to compensate for the deviations of the mirror's shape from the theoretical profile, as well as phase distortions in the atmosphere by changing the lattice weights coefficients.

Keywords: parabolic mirror antenna, phased antenna array, wavefront recovery method, patch antenna, spiral antenna.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-233-242

Адрес для переписки:

Д.В. Довкша
Белорусский государственный университет,
ул. Курчатова, 5, г. Минск 220064, Беларусь
e-mail: d.dovksha@gmail.com

Address for correspondence:

D.V. Douksha
Belarusian State University,
Kurchatova str., 5, Minsk 220045, Belarus
e-mail: d.dovksha@gmail.com

Для цитирования:

Д.В. Довкша, С.В. Лешкевич, В.А. Саечников
Разработка внефокусного облучателя на основе фазированной антенной решетки для параболической зеркальной антенны космической связи.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 3. – С. 233–242.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-233-242

For citation:

D.V. Douksha, S.V. Liashkevich, V.A. Saetchnikov
[Development of an out-of-Focus Irradiator Based on a Phased Antenna Array for a Space Communications' Parabolic Reflector Antenna].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 3, pp. 233–242 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-233-242

Введение

В настоящее время в системах спутниковой и космической связи и радиоастрономии широко используются зеркальные антенные системы. С увеличением апертурных размеров зеркал и переходом на более высокочастотные диапазоны усиливаются требования к точности изготовления зеркал, увеличивается влияние ветровых и температурных деформаций [1–3]. При этом для облегчения веса и уменьшения парусности конструкций зачастую используются сеточные антенны, зеркала которых имеют невысокую жесткость. В конечном счете отклонение формы зеркала от теоретического профиля уменьшает эффективность антенной системы [4]. Также к внешним факторам, уменьшающим эффективность, относятся большая насыщенность окружающего пространства радиосигналами помех и случайные фазовые ошибки, возникающие при прохождении радиоволн через неоднородную атмосферу. Решение перечисленных выше проблем возможно на основе адаптивных фазированных антенных решеток (ФАР) по аналогии с оптикой, где адаптивные системы давно и успешно используются для компенсации фазовых искажений сигнала в атмосфере и повышения предела разрешения оптических систем [5].

Теории адаптивных антенных систем посвящено множество работ [6–8]. Практика их применения широко рассматривается в открытых источниках мировой технической литературы. Таким образом, принципиальные вопросы построения адаптивных ФАР остаются актуальными и в наши дни.

Возможным техническим решением для создания эффективной зеркальной антенны является «гибридная» схема, когда адаптивная ФАР используется в качестве внефокусного облучателя [9–11]. «Гибридная» схема антенны сочетает в себе достоинства высокоэффективных зеркальных антенн и ФАР, позволяет формировать перестраиваемые диаграммы направленности специальной формы и обеспечивать пространственную фильтрацию сигналов и помех. Проведенные оценки показали, что такая схема антенны конкурентоспособна и применение антенной решетки со сравнительно небольшим числом элементов в комплексе может показать лучшие результаты по сравнению с традиционными схемами [12].

Целью данной работы являлась разработка оптимальной конструкции облучателя параболической зеркальной антенны на основе ФАР с определением конфигурации антенной решетки методом восстановления волнового фронта (ВВФ) [13, 14], выбором конструктивного элемента решетки и проведением его экспериментальных исследований. Организация облучателя в виде ФАР позволяет повысить эффективность антенны при небольшом количестве (до 10) элементов.

Определение конфигурации облучателя методом восстановления волнового фронта

При проектировании облучателя использовался метод ВВФ [5]. Физический смысл этого метода заключается в следующем: если облучатель, работающий в режиме передачи, воспроизведет вблизи фокальной плоскости антенны поле, образовавшееся при падении плоской волны, то такой облучатель обеспечит равномерное распределение поля на апертуре зеркала и ВВФ будет близок к плоскому.

Облучение зеркала плоской волной моделировалось в программном пакете HFSS 13.0. На схеме облучения (рисунок 1) изображено зеркало раскрывом 2,4 м, падающая плоская волна напряженностью 1 В/м, а также положение максимума (фокуса) и минимума дифракции на антенной оси OZ .

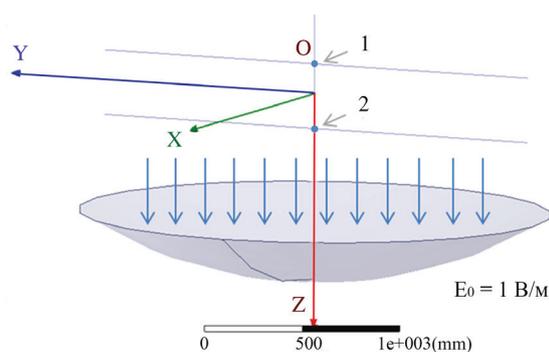


Рисунок 1 – Схема облучения зеркала: 1 – положение максимума дифракции (фокус); 2 – положение минимума дифракции

Figure 1 – Scheme of mirror irradiation: 1 – position of the diffraction maximum (focus); 2 – position of the diffraction minimum

Распределение интенсивности поля вдоль оси OZ антенной системы и вблизи фокальной плоскости перпендикулярно оси OZ представлено на рисунках 2а и 2б соответственно.

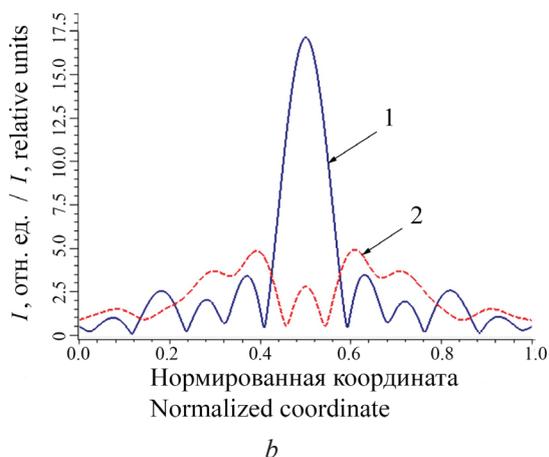
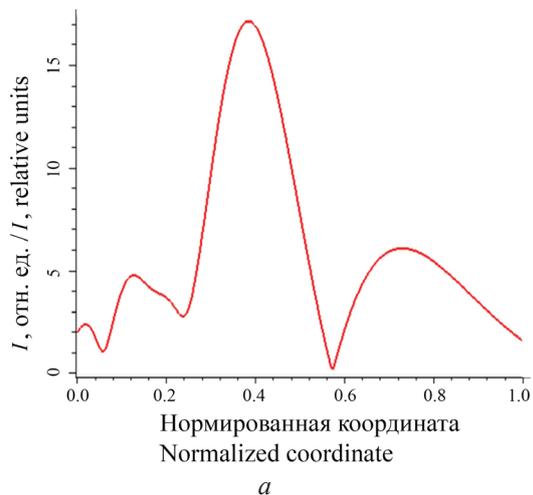


Рисунок 2 – График распределения поля: *a* – вдоль оси *OZ* антенной системы; *b* – вблизи фокальной плоскости антенны (1 – в фокальной плоскости; 2 – в плоскости дифракционного минимума)

Figure 2 – Field distribution diagram: *a* – along the *OZ* axis of the antenna system; *b* – near the focal plane of the antenna (1 – in the focal plane; 2 – in the plane of the diffraction minimum)

Максимум интенсивности поля на рисунке 2*a* соответствует фокусу параболического зеркала, а минимумы – минимумам дифракции.

Принцип действия зеркальной антенны с внефокусным размещением облучателя заключается в воспроизведении фронта волны не в фокальной плоскости (сплошная линия на рисунке 2*b*), где поле сильно неоднородно, а в плоскости дифракционного минимума (прерывистая линия на рисунке 2*b*). В этой плоскости располагается фазированная антенная решетка, обеспечивающая оптимальный засвет апертуры зеркала и корректность восстановления волнового фронта.

Математическая модель

В конструктивном отношении антенная решетка может быть представлена как набор однородных точечных источников. Для математического описания метода ВВФ в программном пакете *MATLAB* был реализован алгоритм для плоского случая, заключающийся в переборе возможных положений источников вдоль выделенного участка прямой. Далее с помощью метода наименьших квадратов находилась оптимальная конфигурация их положений, реализующая минимальную суммарную ошибку в восстановленном поле по отношению к исходному (полученному в *HFSS* при облучении зеркала плоской волной).

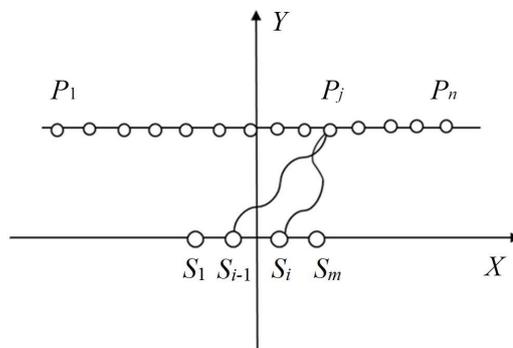


Рисунок 3 – Схема-пояснение к алгоритму восстановления волнового фронта: P_j – точки расчета интенсивности поля ($j = 1, 2, \dots, n$); S_i – положения точечных источников ($i = 1, 2, \dots, m$)

Figure 3 – Schematic explanation of the wavefront recovery algorithm: P_j – field intensity calculation points ($j = 1, 2, \dots, n$); S_i – the positions of point sources ($i = 1, 2, \dots, m$)

Напряженность поля, созданная i -м источником в точке P_j (рисунок 3) вычислялась по формуле:

$$E_{ij} = \frac{E_{0i}}{r_{ij}} \cos(\omega t + kr_{ij} + \varphi_{0i}), \quad (1)$$

где ω – циклическая частота волны; k – волновое число; r_{ij} – расстояние от источника S_i до точки P_j ; φ_{0i} – начальная фаза i -го источника.

Суммарная напряженность в точке P_j , созданная всеми источниками, вычислялась по формуле:

$$E_j = \sum_i E_{ij}. \quad (2)$$

Интенсивность I_j в точке P_j пропорциональна квадрату напряженности. Алгоритм восстановления волнового фронта состоял из трех этапов:

1. Рассчитывалась интенсивность вдоль выделенного участка прямой в точках дискретизации P_j для начальной конфигурации положений источников.

2. Изменялось положение источников, после чего повторно рассчитывалась интенсивность согласно пункту 1.

3. Повторялся пункт 2, пока не была найдена оптимальная конфигурация положений с учетом минимального отклонения восстановленной интенсивности от исходной.

На рисунке 4 представлены графики исходного и восстановленного полей в зависимости от пространственной координаты r вдоль оси, проходящей через дифракционный минимум перпендикулярно антенной оси OZ . Видно, что значения интенсивностей восстановленного и исходного полей достаточно близки.

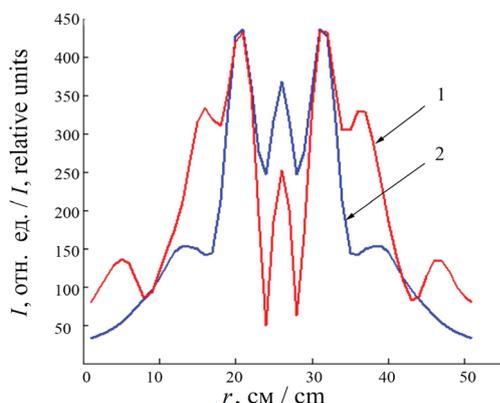


Рисунок 4 – Результат восстановления интенсивности поля: 1 – интенсивность, полученная при облучении зеркала плоской волной, рассчитанная в HFSS; 2 – восстановленная интенсивность, полученная с помощью точечных источников

Figure 4 – Result of restoring of the field intensity: 1 – intensity obtained by irradiating a mirror with a plane wave, calculated in HFSS; 2 – the recovered intensity obtained with the help of point sources

Определение требований к элементу решетки

Определяющими факторами в выборе элемента решетки являлись полуширина главного лепестка диаграммы направленности (ДН) и возможность работы с круговой поляризацией излучения. На ширину главного лепестка непосредственно оказывают влияние волновые размеры антенны. Физически это объясняется характером интерференции волн от элементов

антенны. Из анализа влияния волновых размеров антенны (L/λ) на форму ее ДН для наиболее простого случая – непрерывной линейной антенны длиной L , следует, что ширина главного лепестка ДН у синфазных антенн обратно пропорциональна волновым размерам антенны:

$$2\theta_{0,5}^0 \approx C_{0,5}^0 \frac{\lambda}{L}, \quad (3)$$

а для антенны бегущей волны – обратно пропорциональна корню волновых размеров:

$$2\theta_{0,5}^0 \approx C_{0,5}^0 \sqrt{\frac{\lambda}{L}}. \quad (4)$$

Из вышеизложенного следует, что ширина главного лепестка антенны бегущей волны слабее зависит от волновой длины антенны. Графическое пояснение представлено на рисунке 5.

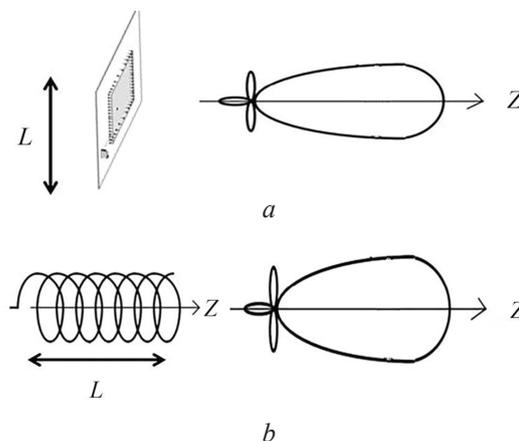


Рисунок 5 – Влияние волновых размеров на форму диаграммы направленности для: *a* – синфазной антенны; *b* – антенны бегущей волны

Figure 5 – The effect of wave dimensions on the shape of the radiation pattern for: *a* – common-mode antenna; *b* – traveling wave antennas

В качестве конструктивного элемента антенной решетки рассмотрены такие антенны как: патч-антенна, плоская спиральная антенна, коническая спиральная антенна. Проведен электродинамический расчет данных типов антенн методом конечных элементов в программе Ansoft HFSS. 3D модели антенн представлены на рисунке 6. Во всех моделях используется воздушное диэлектрическое заполнение и частота возбуждения 1,7 ГГц (L -диапазон спутниковой связи).

Рассчитанные ДН и частотные зависимости обратных потерь для трех рассмотренных типов конструктивного элемента представлены на рисунке 7.

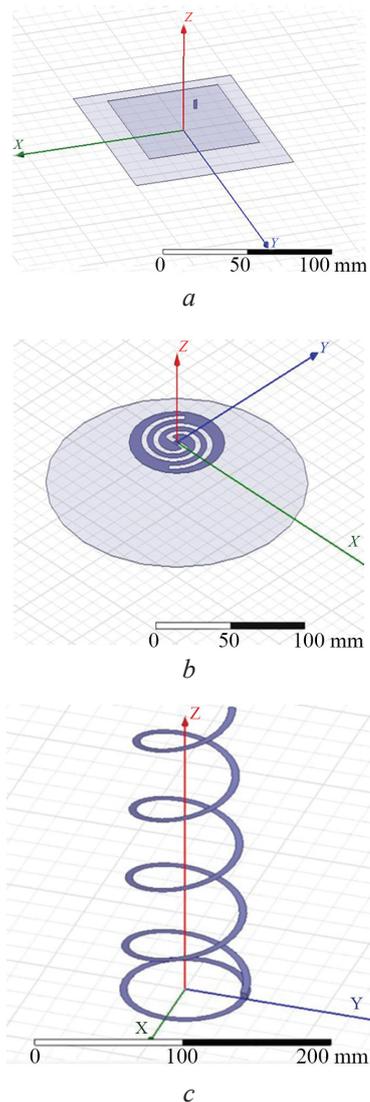


Рисунок 6 – 3D модели антенн: *a* – патч-антенна; *b* – щелевая спиральная антенна; *c* – коническая спиральная антенна

Figure 6 – 3D antenna models: *a* – patch antenna; *b* – slot spiral antenna; *c* – conical spiral antenna

Для анализа эффективности рассмотрены требования к ДН промоделированных антенн. По проведенным оценкам оптимальная полуширина ДН элемента составила 20° . В случае патч-антенны и плоской спиральной антенны, которые являются синфазными, вычисленные полуширины ДН составили около 35° , что значительно превосходит оптимальные 20° . Основным способом повышения направленности излучения является увеличение волновых размеров антенны. Однако такое увеличение размеров приведет к невозможности размещения элементов в составе решетки и, следовательно, к невыполнению условий ВВФ.

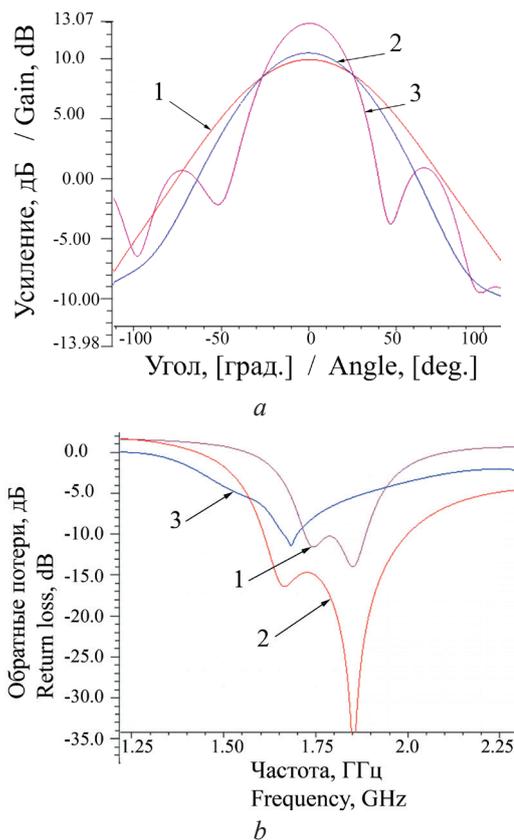


Рисунок 7 – Коэффициент усиления (*a*) и частотная зависимость обратных потерь (*b*) для трех вариантов антенн в прямоугольной системе координат: 1 – патч антенна; 2 – щелевая спиральная антенна; 3 – коническая спиральная антенна

Figure 7 – Gain (*a*) and frequency dependence of return loss (*b*) for three antenna variants in a rectangular coordinate system: 1 – patch antenna; 2 – slit helical antenna; 3 – conical helical antenna

В случае конической спиральной антенны используется режим осевого излучения, или режим бегущей волны, который позволяет существенно сузить полуширину главного лепестка ДН до оптимальных 20° за счет больших продольных размеров антенны. Габариты элементов по ширине позволяют разместить элементы в узлах решетки, обеспечив корректность ВВФ.

Конструктивные параметры рассмотренной спиральной антенны следующие: размер первого витка – 20,38 см, второго – 21,95 см, третьего – 23,5 см, четвертого – 25,1 см; расстояние между витками – 6 см. Коэффициент усиления и ширина рабочей полосы, полученные при моделировании, составили 10,6 дБ и 500 МГц соответственно. Волновое сопротивление – 100 Ом.

Таким образом, с точки зрения требований к ДН оптимальной из рассмотренных вариантов

является коническая спиральная антенна из 4 витков и с полушириной ДН 20° . К преимуществам конической спиральной антенны можно отнести также круговую поляризацию излучения.

Моделирование

Рассмотрим возможные конструкции антенной решетки на основе перечисленных выше конструктивных элементов (рисунок 8).

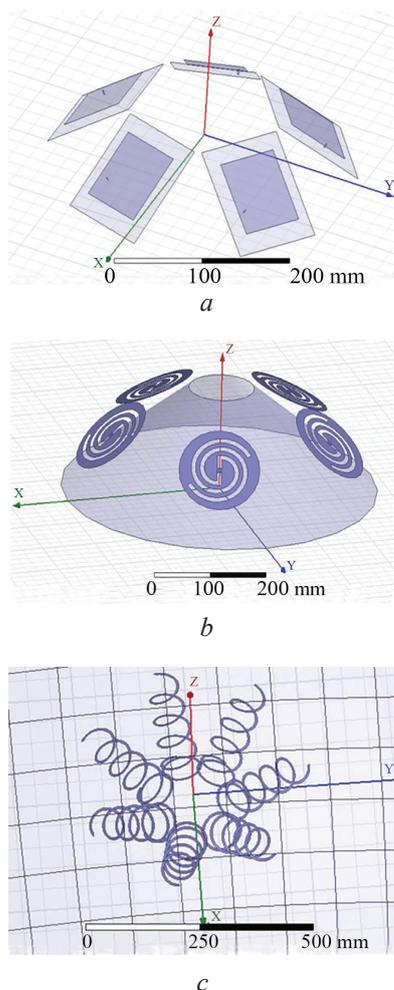


Рисунок 8 – Конструкция антенной решетки-облучателя на основе: *a* – патч-антенн; *b* – плоских спиральных антенн; *c* – конических спиральных антенн

Figure 8 – Antenna array design based on: *a* – patch antennas; *b* – slot spiral antennas; *c* – conical spiral antennas

В первом случае была промоделирована система из пяти патч облучателей и проведен ее расчет. В результате выбраны параметры решетки, такие как: расстояние до зеркала вдоль оси антенной системы, угол наклона элементов, расстояние между элементами. Проведена про-

граммная оптимизация параметров по критерию максимума коэффициента усиления. Схема разработанной конструкции приведена на рисунке 8*a*. Полученный коэффициент усиления составил 29,7 дБ.

Во втором случае рассмотрена решетка из пяти плоских спиральных антенн и металлического экрана (юбки) в форме усеченного конуса. Возможный вид конструкции облучателя представлен на рисунке 8*b*. Полученный коэффициент усиления данной конструкции оказался равен 30,5 дБ.

В третьем случае рассмотрена конструкция облучателя на основе конических спиральных антенн (рисунок 8*c*). Исходя из результатов моделирования оптимальный результат по засвету апертуры зеркала (рисунок 9*b*) и максимальное усиление (рисунок 9*a*) обеспечил именно этот вариант конструкции.

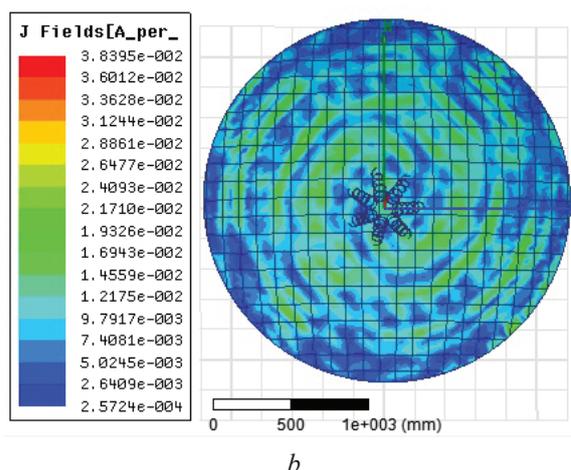
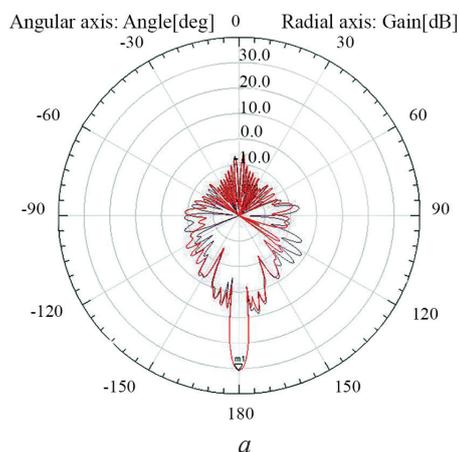


Рисунок 9 – Диаграмма направленности системы с облучателем на основе спиральных антенн (*a*) и засвет апертуры зеркала (*b*)

Figure 9 – The radiation pattern of a system with an irradiator based on spiral antennas (*a*) and the light of the mirror aperture (*b*)

Таким образом, приведенная конструкция облучателя на основе спиральных антенн равномерно засвечивает апертуру зеркала; оценка коэффициента усиления антенной системы составляет 30,8 дБ, что для данного размера зеркала (2,4 м) близко к традиционным антенным схемам.

Результаты измерений конического спирального облучателя

Экспериментальные измерения проводились в безэховой камере с использованием анализатора сигналов (*Signal analyzer KEITHLEY 2810*). Оборудование подключалось по схеме, изображенной на рисунке 10. В качестве приемной антенны использовалась исследуемая коническая спираль. Общий вид экспериментального образца представлен на рисунке 11. Передающей антенной служил эталонный рупорно-линзовый облучатель (измерительная антенна П6-23), работающий в том же частотном диапазоне, что и спиральный элемент. Исследуемый приемный элемент закреплялся на опорно-поворотном устройстве, позволяющем снимать диаграммы направленности в горизонтальной и вертикальной плоскостях в секторе углов от 0 до 180°. Изменяя положения приемного элемента в горизонтальной и вертикальной плоскости, производились замеры уровня принимаемого сигнала в децибелах по отношению к одному милливатту.

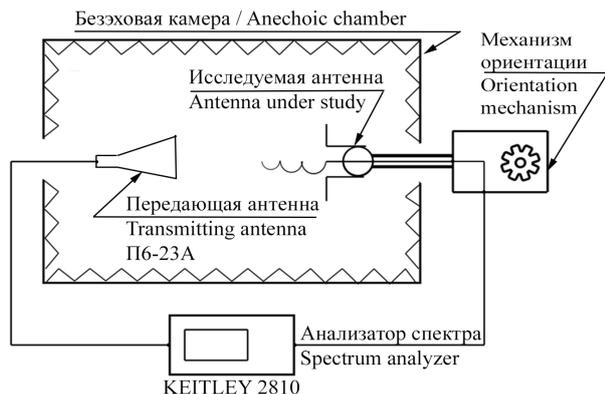


Рисунок 10 – Схема подключения оборудования для экспериментальных измерений

Figure 10 – Connection diagram of equipment for experimental measurements

Результат измерения диаграммы направленности и обратных потерь исследуемого элемента представлены на рисунке 12.

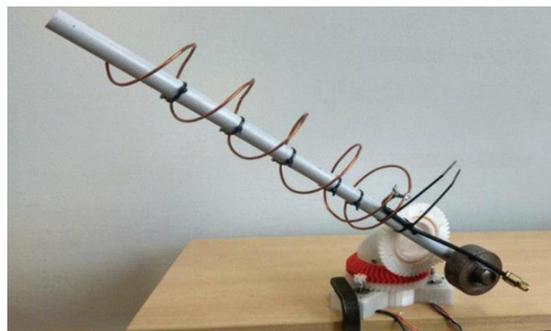


Рисунок 11 – Фото изготовленного экспериментального образца спирального элемента

Figure 11 – Photo of an experimental sample made of a spiral element

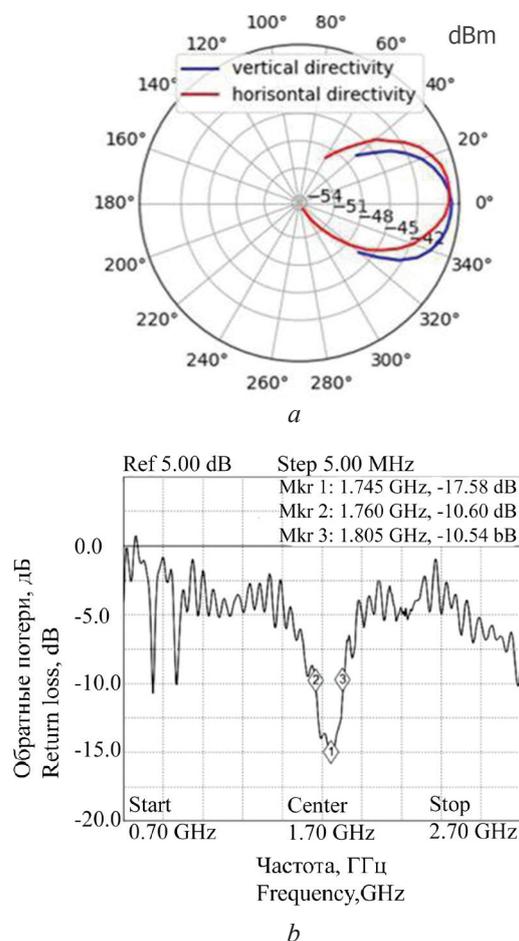


Рисунок 12 – Диаграмма направленности в горизонтальной (красным цветом) и вертикальной (синим цветом) плоскостях на частоте 1,7 ГГц (a) и обратные потери для спиральной антенны-облучателя (b)

Figure 12 – Radiation pattern in the horizontal (red) and vertical (blue) planes at a frequency of 1.7 GHz (a) and return loss for a spiral antenna feed (b)

Экспериментально измеренные диаграмма направленности и частотная зависимость

обратных потерь для спирального элемента достаточно близки к результатам теоретического электродинамического расчета. Ширина рабочей полосы по уровню минус 10 дБ составила 150 МГц. Сужение полосы, в сравнении с теоретической, обусловлено потерями при согласовании кабеля сопротивлением в 50 Ом с антенной сопротивлением в 100 Ом. Спиральный элемент технологичен в изготовлении, обладает хорошими диапазонными свойствами, простотой конструкции и настройки.

Заключение

Предложена новая схема облучения зеркала внефокусной кольцевой антенной решеткой, которая позволяет компенсировать отклонение формы зеркала от идеальной путем выбора весовых коэффициентов антенной решетки и тем самым повысить эффективность антенной системы в целом. Рассмотрены возможные конструктивные элементы фазированной антенной решетки: патч, плоская спиральная антенна, коническая спиральная антенна. Проведено программное моделирование антенной системы, состоящей из параболического зеркала и фазированной антенной решетки в качестве внефокусного облучателя (для трех различных вариантов конструкций). Проведена оптимизация геометрии облучателя по критерию максимального усиления.

По результатам измерений выбран оптимальный вариант облучателя на основе конических спиральных антенн. Такая конструкция обеспечивает наиболее равномерный засвет и усиление в 30,8 дБ, что для данного размера зеркала (2,4 м) близко к традиционным антенным схемам.

Список использованных источников

1. Галимов, Г.К. Антенны радиотелескопов, систем космической связи и РЛС / Г.К. Галимов. – М.: Адвансед Солюшнз. – 2013. – 392 с.
2. W.A. van Cappellen. APERTIF: Phased array feeds for the wester-bork synthesis radio telescope / W.A. van Cappellen, L. Bakker // 2010 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. – Waltham, MA. – 2010. – P. 640–647.
DOI: 10.1109/ARRAY.2010.5613297
3. Ivashina, M.V. Off-axis beam performance of Focal Plane Arrays for the Westerbork Synthesis

Radio Telescope – Initial results of a prototype system / M.V. Ivashina [et al.] // 2009 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. – Charleston, SC. – 2009. – P. 1–4.

DOI: 10.1109/APS.2009.5171751

4. Гиммельман, В.Г. Система адаптации панелей зеркала космического телескопа / В.Г. Гиммельман, Я.Ю. Федоров, С.С. Щесняк // Сибирский государственный университет науки и технологий. Решетневские чтения. – 2016. – № 20. – С. 98–100.

5. Ермолаева, Е.В. Адаптивная оптика / Е.В. Ермолаева, В.А. Зверев, А.А. Филатов // СПб: НИУ ИТМО. – 2012. – 297 с.

6. Robert A. Monzingo. Introduction to Adaptive / R.A. Monzingo, T.W. Miller // SciTech Publishing. – 2004. – 543 p.

7. Allen Ben. Adaptive Array Systems: Fundamentals and Applications / Ben Allen, M. Ghavamiu // London: John Wiley & Sons. – 2005. – 290 p.

8. Пистолькорс, А.А. Введение в теорию адаптивных антенн / А.А. Пистолькорс, О.С. Литвинов. – М.: Наука. – 1991. – 200 с.

9. Летунов, А.А. Синтез гибридной зеркальной антенны для систем наземной спутниковой связи / А.А. Летунов [и др.] // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2015. – № 4. – С. 107–113.

DOI: 10.17277/voprosy.2015.04.pp.107-113

10. Тяпкин, В.Н. Алгоритмы адаптации многолучевых антенн, построенных на базе гибридно-зеркальных антенн / В.Н. Тяпкин, Д.Д. Дмитриев, А.С. Першин // Сибирский федеральный университет. – 2013. – № 6(7). – С. 835–844.

11. Пономарев, О.П. Гибридные зеркальные антенны на основе зеркал с круговым профилем для многофункциональных радиолокационных станций / О.П. Пономарев, Н.Н. Смирнов, С.М. Клишин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2010. – № 2(97). – С. 23–30.

12. Зельчан, А.Д. Оценка эффективности применения фазированной решетки в качестве облучателя зеркальной антенны, предназначенной для приема сигналов студенческого спутника / А.Д. Зельчан [и др.] / Минск: VII Белорусский космический конгресс. – 2017. – Т. 2. – С. 118–121.

13. Дмитриев, В.Г. Нелинейная оптика и обращение волнового фронта / В.Г. Дмитриев. – М.: Физматлит. – 2003. – 256 с.

14. Хашимов, А.Б. Регуляризирующие схемы в задачах восстановления поля излучения антенн по измерениям в ближней зоне / А.Б. Хашимов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2014. – Т. 14, № 2. – С. 70–80.

References

1. Galimov G.K. *Antenny radioteleskopov, sistem kosmicheskoy svyazi i RLS* [Radiotelescope antenna, space communication systems and radar]. Galimov, Moscow, Advanced Solyushnz Publ., 2013, 392 p.
2. W.A. van Cappellen, L. Bakker. APERTIF: Phased array feeds for the wester-bork synthesis radio telescope // 2010 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, Waltham, MA, 2010, pp. 640–647. DOI: 10.1109/ARRAY.2010.5613297
3. Ivashina M.V., Iupikov O.A., Maaskant R., W.A. van Cappellen, Bakker L., Oosterloo T. Off-axis beam performance of Focal Plane Arrays for the Westerbork Synthesis Radio Telescope – Initial results of a prototype system // 2009 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Charleston, SC, 2009, pp. 1–4. DOI: 10.1109/APS.2009.5171751
4. Gimmelman V.G., Fedorov I.I., Shchesniak S.S. [Adaptation system for space telescope surface boards] *Sibirskij gosudarstvennyj universitet nauki i tekhnologii. Reshetnevskie chteniya*. [Reshetnev Siberian State University of Science and Technology], 2016, no. 20, pp. 98–100 (in Russian).
5. Ermolaeva E.V., Zverev V.A., Filatov A.A. *Adaptivnaya optika* [Adaptive optics]. St. Petersburg: NIU ITMO Publ., 2012, 297 p.
6. Robert A. Monzingo, Thomas W. Miller Introduction to Adaptive Arrays. SciTech Publishing, 2004, 543 p.
7. Allen Ben, Ghavamiu M. Adaptive Array Systems: Fundamentals and Applications. London, John Wiley & Sons Publ., 2005, 290 p.
8. Pistolkors A.A., Litvinov O.S. *Vvedenie v teoriyu adaptivnykh anten* [Introduction to the adaptive arrays theory], Moscow, Nauka Publ., 1991, 200 p.
9. Letunov A.A., Belousov O.A., Kolmykov R.Yu., Kolmykova A.S., Kurnosov R.Yu. [Synthesis of Hybrid Reflector Antenna for Terrestrial Satellite Communication System]. *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Tambov State Technical University], 2015, no. 4(58), pp. 107–113 (in Russian). DOI: 10.17277/voprosy.2015.04.pp.107-113
10. Tyapkin V.N., Dmitriev D.D., Pershin A.S. [The Adaptive Algorithm Multibeam Antenna, Built on the Hybrid-Reflector]. *Sibirskij federal'nyj universitet* [Antenna. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies], 2013, no. 6(7), pp. 835–844 (in Russian).
11. Ponomarev O.P., Smirnov N.N., Klishin S.M. [Hybrid antennas based on circular reflectors for the multifunction radars]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie* [Journal of the St. Petersburg Polytechnic University/Scientific and technical statements. Series “Computer science. telecommunications. control”], 2010, no. 2(97), pp. 23–30 (in Russian).
12. Zelchan A.D., Zolotova A.V., Leshkevich S.V., Saechnikov V.A. Evaluation of the effectiveness of the use of a phased array as an irradiator of a mirror antenna designed to receive signals from a student satellite. VII Belarusian Space Congress. Minsk-2017, vol. 2, pp. 118–121 (in Russian).
13. Dmitriev V.G. *Nelinejnaya optika i obrashchenie volnovogo fronta* [Nonlinear optics and wavefront reversal]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003, 256 p.
14. Khashimov A.B. [Regularization techniques for reconstruction of antenna radiated field by near field measurements]. *Vestnik YUUrGU. Seriya “Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika”* [Bulletin of the South Ural State University Series “Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics”], 2014, vol. 14, no. 2, pp. 70–80 (in Russian).

УДК 621.327.8:535.41

Моделирование распределенного измерителя силы тока на основе деформации оптического волокна

Т.П. Янукович, А.В. Поляков

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

Поступила 20.06.2019

Принята к печати 05.08.2019

В связи с развитием систем автоматизации и контроля большой интерес вызывают методы и приборы для измерения больших значений силы тока. Целью работы являлась разработка принципиальной схемы распределенного сенсора силы тока на основе анализа частотных характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна; создание математической модели сенсора для демонстрации его работы и расчет его основных параметров.

Для проведения измерений использовалось оптическое волокно с токопроводящим покрытием. Между токовой шиной, силу тока в которой необходимо измерить, и токопроводящим покрытием возникает сила Ампера, которая в свою очередь приводит к появлению деформации волокна. Вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна имеет характеристическую частоту, значение которой зависит от величины деформации волокна. Изменение значения этой частоты позволяет измерить значение силы тока в токовой шине. Для регистрации изменения частоты и фиксации местоположения возмущения использовался метод анализа частотных характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна.

Приведена математическая модель работы сенсора на основе трехволновой модели вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна. Данная модель позволяет найти изменение интенсивности оптического сигнала, проходящего по оптическому волокну, в зависимости от изменения характеристической частоты рассеяния. Метод использует обратное Фурье-преобразование для построения функции импульсного отклика.

Представлена принципиальная схема распределенного сенсора силы тока на основе метода анализа частотных характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна. Проведена априорная оценка параметров измерительной системы исходя из математической модели вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в оптическом волокне. Пространственное разрешение сенсора при определении длины и местоположения участков волокна составляет 0,06 м. Разрешающая способность сенсора составляет 0,22 кА, максимальное значение силы тока 25 кА. Исследована зависимость работы сенсора при различных мощностях излучения используемого лазера. Рассмотрено влияние изменения показателя преломления оптического волокна на результат измерения.

Ключевые слова: сила тока, деформация, оптоволокно, местоположение.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-243-252

Адрес для переписки:

Т.П. Янукович
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: YanukovichTP@bsu.by

Address for correspondence:

T.P. Yanukovich
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: YanukovichTP@bsu.by

Для цитирования:

Т.П. Янукович, А.В. Поляков
Моделирование распределенного измерителя силы тока на основе деформации оптического волокна.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 3. – С. 243–252.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-243-252

For citation:

T.P. Yanukovich, A.V. Polyakov
[Simulation of Distributed Current Sensor Based on Optical Fiber Deformation].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 3, pp. 243–252 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-243-252

Simulation of Distributed Current Sensor Based on Optical Fiber Deformation

T.P. Yanukovich, A.V. Polyakov

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

Received 20.06.2019

Accepted for publication 05.08.2019

Abstract

Due to the development of automation and control systems, methods and devices for measuring of electric current large values are of great interest. The aim of the work was to develop a schematic diagram of a distributed current strength sensor based on the Brillouin optical frequency domain analysis; to create a mathematical model of the sensor to demonstrate its work and to calculate the basic parameters of the sensor.

To provide the measurement optical fiber with conductive coating is used. Between the current bus, where current is measured, and conductive coating the Ampere force arises. Strain occurs in optical fiber due to this force. Stimulated Brillouin scattering has the strain dependent characteristic frequency. Shift of the characteristic frequency allows to measure current in the bus. To measure the characteristic frequency and the location of its shift Brillouin optical frequency domain analysis is used.

The mathematical model of sensor operation based on tree-wave model of stimulated Brillouin scattering is demonstrated. This model allows calculating intensity of optical signal in the fiber in dependence of characteristic frequency shift. Brillouin optical frequency domain analysis uses inverse Fourier transform to obtain pulse response.

A schematic diagram of a distributed current sensor based on the method of Brillouin optical frequency domain analysis is presented. An a priori estimate of parameters of the measuring system was carried out on the basis of the mathematical model of stimulated Brillouin scattering in an optical fiber. The spatial resolution of the sensor when determining the length and location of fiber sections was 0.06 m. The resolution of the sensor was 0.22 kA, the maximum value of the current strength was 25 kA. Dependence of the sensor operation at different powers of the laser used was investigated. The refractive index change influence on the result of measurements was estimated.

Keywords: electric current, deformation, optical fiber, location.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-243-252

Адрес для переписки:

Т.П. Янукович
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: YanukovichTP@bsu.by

Address for correspondence:

T.P. Yanukovich
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: YanukovichTP@bsu.by

Для цитирования:

Т.П. Янукович, А.В. Поляков
Моделирование распределенного измерителя силы тока на основе деформации оптического волокна.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 3. – С. 243–252.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-243-252

For citation:

T.P. Yanukovich, A.V. Polyakov
[Simulation of Distributed Current Sensor Based on Optical Fiber Deformation].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 3, pp. 243–252 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-243-252

Введение

В связи с развитием систем автоматизации и контроля большой интерес вызывают методы и приборы для измерения основных параметров электрических генерирующих, транспортирующих и потребляющих устройств. Недостатком используемых сейчас систем измерения силы тока являются характеристики первичных преобразователей – высоковольтных трансформаторов тока. Их погрешность зависит от режима нагрузки, дополнительная погрешность накапливается, они пригодны только для измерения переменных токов. Для анализа данных первичного преобразователя используются электросчетчики. Их показания зависят от постоянства значения амплитуды и фазы переменного электрического сигнала. В качестве первичного преобразователя можно использовать датчик Холла. Он имеет большую точность и может измерять постоянный ток. Но его недостатком, так же, как и трансформаторов, является наличие эффекта насыщения, сильно ограничивающего диапазон измеряемых токов. При их установке необходимы сложные процедуры настройки для исключения влияния асимметричного поля и перекрестных наводок с расположенных рядом шин [1].

Большое значение имеет независимость измерительного устройства от измеряемой величины, так называемая развязка. Оптические датчики обладают рядом преимуществ. Они независимы от внешних полей, имеют малые габариты и достаточно просты в монтаже. Волоконно-оптические системы являются оптимальным решением большинства задач, возникающих при измерении силы тока. Такие системы обеспечивают точные измерения в большом диапазоне токов, развязку по электропитанию с измеряемыми системами, позволяют обрабатывать сигнал в режиме реального времени, результаты измерений обладают достоверностью и повторяемостью. В настоящее время используются оптоволоконные датчики на основе эффекта Фарадея [2, 3], представляющие собой солиноиды стандартных одноименных волокон, подключенных по рециркуляционной схеме [4, 5], по схеме интерферометра Саньяка [6]; волокно, легированное квантовыми точками CdSe для повышения чувствительности; в качестве датчиков применяются специальные магнито-оптические материалы и пластиковые оптические волноводы для передачи оптических сигналов [8–10]. Однако они требуют использова-

ние специфического оптического волокна, не позволяют одновременное измерение в различных точках. Кроме этого, существуют датчики на основе магнестрикции и деформации. Но они могут работать только в одной точке и создать на основе этих эффектов датчик, работающий распределенно, не представляется возможным.

В настоящее время активно изучается и применяется новый класс волоконно-оптических датчиков, использующих вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ). При создании таких сенсоров используется свойство изменения характеристической частоты вынужденного рассеяния при изменении температуры и деформации волокна. Кроме этого, такие сенсоры позволяют измерять не только воздействие величины температуры и деформации, но и ее местоположение. Первый класс сенсоров, созданных на этой базе, использовал анализ временной характеристики ВРМБ [11]. Для повышения чувствительности и сокращения времени измерений был предложен новый метод анализа частотных характеристик ВРМБ [12]. Увеличение соотношения сигнал-шум достигается использованием обратного Фурье преобразования. Применение этого преобразования уменьшает погрешность, связанную со спонтанным излучением Мандельштама–Бриллюэна. Трехволновая модель ВРМБ в оптическом волокне подробно рассмотрена в работах [12, 13].

Целью работы являлась разработка принципиальной схемы распределенного сенсора силы тока на основе анализа частотных характеристик ВРМБ, создание математической модели сенсора для демонстрации его работы и расчет основных параметров сенсора.

Принцип работы сенсора

Индукцию B магнитного поля проводника с током I можно рассчитать согласно закону Био–Савара–Лапласа:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{r^3} [d\mathbf{l}, \mathbf{r}],$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; \mathbf{r} – радиус-вектор точки, в которой рассчитывается индукция магнитного поля; $d\mathbf{l}$ – элемент длины проводника, направление которого определяется направлением тока.

Для уединенного проводника большой длины, магнитную индукцию можно рассчитать по формуле:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}.$$

Если рядом с первым проводником с током I разместить еще один с током i , то между ними возникнет сила Ампера F_A :

$$F_A = iBl = \frac{\mu_0 Iil}{2\pi r}. \quad (1)$$

В случае, если токи I и i направлены противоположно, сила Ампера будет направлена перпендикулярно проводнику и отталкивать его, и в случае закрепленного проводника приведет к его поперечной деформации. Согласно закону Гука, деформирующее усилие можно записать:

$$\frac{F}{S} = E\varepsilon, \quad (2)$$

где S – площадь сечения, перпендикулярного действию силы; E – модуль Юнга материала образца; ε – относительная деформация образца.

Так как деформация вызывается силой Ампера, то из выражений (1) и (2) можно получить:

$$\frac{\mu_0 Iil}{2\pi r} = E\varepsilon S.$$

Учитывая, что площадь сечения проводника, перпендикулярного действию силы, можно вы-

числить как произведение длины проводника l на его диаметр d , можно выразить связь тока I и относительной деформации ε :

$$I = \frac{2\pi r d E}{\mu_0 i} \varepsilon. \quad (3)$$

Таким образом, сила тока I в проводнике приводит к возникновению пропорциональной относительной деформации ε .

Структура распределенной оптоволоконной системы измерения силы тока

Схема установки для измерения силы тока методом анализа бриллюэновского оптического частотного домена представлена на рисунке 1.

В качестве чувствительного элемента сенсора используется одномодовое оптическое волокно длины L . Участки волокна длиной l_1 , l_2 и l_3 закреплены вдоль токовых шин с токами I_1 , I_2 и I_3 , покрыты проводящей оболочкой из алюминия. При пропускании тока i , направление которого противоположно направлению тока в токовой шине, по проводящей оболочке между шиной и оболочкой волокна возникает сила Ампера, она вызывает деформацию оптического волокна.

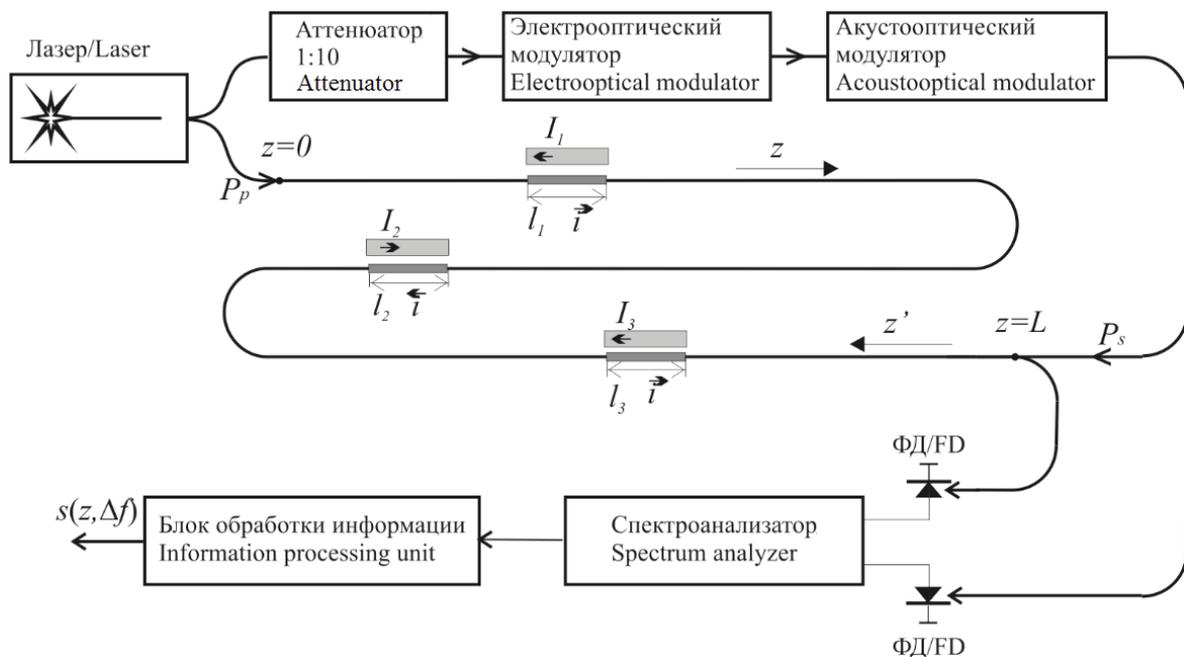


Рисунок 1 – Схема установки для измерений методом анализа частотных характеристик ВРМБ

Figure 1 – Brillouin optical frequency domain analysis measurement scheme

Источником излучения в установке служит твердотельный узкополосный лазер с длиной волны $\lambda = 1,319$ мкм и мощностью $P = 1 \div 10$ мВт. Излучение лазера разделяется на два потока. Один из них формирует непрерывное излучение накачки с частотой f_p и мощностью $P_p(0)$, которое вводится с одной стороны чувствительного оптического волокна, имеющего координату $z = 0$. Второй поток направляется на аттенуатор, где его мощность ослабляется в 10 раз. Затем с помощью электрооптического модулятора частота излучения сдвигается на величину Δf относительно частоты излучения накачки f_p и становится равной f_s . Установленная разность частот $\Delta f = f_p - f_s$ между излучением накачки и пробным излучением является переменной. Пробное излучение модулируется с помощью акустооптического модулятора по гармоническому закону в пределах от 10 Гц до 80 МГц и с другой стороны чувствительного оптического волокна, имеющего координату $z = L$. Внутри оптического волокна излучение накачки и пробное распространяются навстречу друг другу. Если разность частот излучений Δf равна характеристической частоте ВРМБ f_B , формируется акустическая волна с частотой $\Delta f = f_B$ и происходит рассеяние части излучения накачки, что приводит к ослаблению его мощности и усилению мощности пробного излучения. При этом излучение накачки приобретает частичную модуляцию, соответствующую модуляции пробного излучения. Мощность модулированного пробного излучения и излучения накачки детектируется фотодиодами. Далее детектированный сигнал поступает на спектроанализатор и обрабатывается дифференциальным методом, где в качестве опорного используется сигнал пробного излучения. Блок обработки информации выполняет обратное Фурье преобразование полученного спектра сигнала, зависящего от частоты модуляции пробного излучения и разности частот лазера. Анализируя полученную комплексную передаточную функцию $s(z, \Delta f)$ [12], зависящую от координаты и разности частот лазеров, можно определить величину тока в токоведущей шине и координату участка с током.

Моделирование работы сенсора

Для проведения моделирования использовалось одномодовое оптическое волокно, диаметр которого 125 мкм (диаметр сердцевины 9 мкм), с оболочкой из алюминия, по которой

пропускается ток $i = 1$ А. Волокно расположено на расстоянии 1 см от токовой шины. В модели рассмотрены три участка волокна, длиной $l_1 = 0,2$ м, $l_2 = 0,1$ м, $l_3 = 0,3$ м. Зависимость характеристической частоты ВРМБ от относительной деформации:

$$f_B = f_{B,0} + \frac{\partial f}{\partial \varepsilon} \varepsilon, \quad (4)$$

где ε – относительная деформация участка оптического волокна; $\partial f / \partial \varepsilon = 500$ кГц – деформационный коэффициент характеристической частоты ВРМБ, полученный экспериментально [11].

Результаты моделирования представлены на рисунке 2 в виде зависимости действительной части передаточной функции s от координаты волокна z и разности частот лазеров Δf . Передаточная функция имеет наибольшее значение в начале волокна и плавно уменьшается к концу волокна. Такое поведение функции характерно для недеформированного волокна. Минимум передаточной функции наблюдается при разности частот излучения накачки и пробным излучением $\Delta f = 1,28 \cdot 10^{10}$ Гц. Такая разность частот соответствует характеристической частоте ВРМБ для недеформированного волокна. Однако на рисунке 2 есть скачкообразные увеличения значения передаточной функции при координате $z = 80; 180; 240$ м от начала волокна. Такие изменения в передаточной функции говорят о том, что на этих участках волокна не происходит ослабление сигнала за счет ВРМБ. Следовательно, на этих участках изменяется характеристическая частота ВРМБ. После выявления участков с измененной характеристической частотой, производится анализ зависимости передаточной функции от разности частот лазеров Δf . Минимум передаточной функции будет соответствовать разности частот, на которой наблюдалось максимальное ВРМБ данном участке волокна. Именно это значение разности частот будет соответствовать характеристической частоте ВРМБ на данном участке и позволит вычислить значение измеряемого тока.

Зависимость передаточной функции от координаты волокна, представленная на рисунке 3а, позволяет обнаружить расположение участков со смещенной характеристической частотой ВРМБ и их длину. В данной модели при координате $z = 80$ м обнаруживается участок длиной $l_1 = 0,2$ м, при координате $z = 180$ м – участок длиной $l_2 = 0,1$ м,

при координате $z = 240$ м – участок длиной $l_3 = 0,3$ м. На каждом из них происходит изменение характеристической частоты. Согласно зависимости передаточной функции от разности частот излучений (рисунок 3b) определяется, какой частоте соответствует минимум передаточной функции на различных участках и тем самым можно определить деформацию. Кривые 1 ($z = 80$ м), 2 ($z = 180$ м) и 3 ($z = 240$ м) соответствуют зависимости передаточной функции от частоты на участках, где оптическое волокно находится под воздействием силы тока, кривая 4 ($z = 1$ м) показывает, как будет выглядеть зависимость передаточной функции для участка оптического волокна, не подверженного внешним воздействиям. Сила тока будет определяться по формуле:

$$I = c \cdot \Delta f,$$

где c – коэффициент пропорциональности, зависящий от размера волокна, его модуля Юнга, а также от расстояния между волокном и шиной. В данной модели, согласно (3) и (4):

$$c = \frac{2\pi r d E}{\mu_0 i} \frac{\partial f}{\partial \varepsilon} = 0,432 \cdot 10^{-3} \text{ А/Гц.}$$

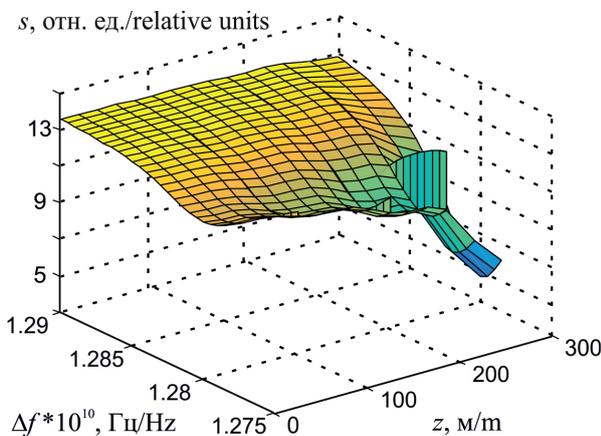
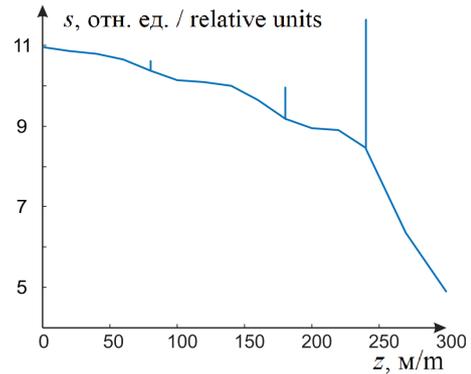


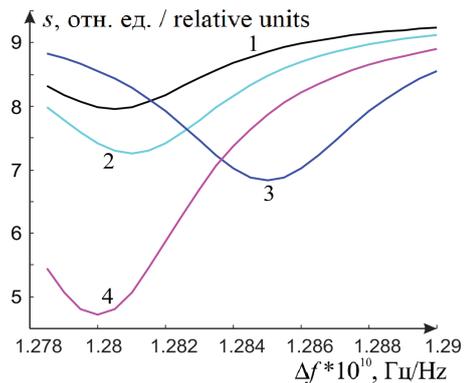
Рисунок 2 – Зависимость передаточной функции s от координаты оптического волокна z и от разности частот излучений Δf

Figure 2 – Dependence of pulse response s on coordinate of optical fiber z and on radiation frequency difference Δf

В результате проведенного моделирования получены результаты: на участке с координатой $z = 80$ м сила тока I составила 2,2 кА, на участке с координатой $z = 180$ м – $I = 4,4$ кА и на участке с координатой $z = 240$ м – $I = 25$ кА.



a



b

Рисунок 3 – Зависимость передаточной функции s от координаты z при разности частот излучений $\Delta f = 12,8$ ГГц (*a*) и от разности частот лазеров Δf на участках волокна с координатами $z = 80$ м (1); $z = 180$ м (2); $z = 240$ м (3); $z = 1$ м (4) (*b*)

Figure 3 – Dependence of pulse response s on coordinate of optical fiber z ($\Delta f = 12,8$ GHz) (*a*) and on radiation frequency difference Δf on the spot with coordinate $z = 80$ м (1); $z = 180$ м (2); $z = 240$ м (3); $z = 1$ м (4) (*b*)

Чувствительность измерений силы тока методом АБОЧД определяется минимальной частотой, на которую смещается излучение лазера электрооптическим модулятором. В представленной модели минимальная разность частот между излучением накачки и пробным излучением составляет $\Delta f = 0,5$ МГц, следовательно, разрешающая способность достигает величины 0,22 кА. Максимальное значение определяется не только возможностями электрооптического модулятора, но и изменением свойств оптического волокна под действием деформации. Максимальное измеренное значение тока в представленной модели составило 25 кА.

Особенностью представленного сенсора является то, что характеристическая частота ВРМБ зависит не только от деформации, но и от темпе-

ратуры. При прогреве оптического волокна смещение характеристической частоты изменяется по закону:

$$f_B = f_{B,0} + \frac{\partial f}{\partial T}(T - T_0).$$

Токовые шины, используемые в промышленности, являются теплоизолированными. Однако прохождение тока по оболочке оптического волокна приведет к его прогреву. Так, если оптическое волокно в оболочке, изготовленной из алюминия, будет теплоизолировано, то его температура будет повышаться каждые 5 с на 1 °С, что приведет к изменению характеристической частоты оптического волокна на 1,2 ГГц. Для проведения точных измерений необходимо поддерживать температуру волокна постоянной.

Следует отметить, что ВРМБ происходит по всей длине волокна. Однако ослабление сигнала зависит от длины волокна на всех частотах. К концу волокна потери больше, чем в начале. Это позволяет калибровать тестовое волокно и избежать ошибки при проведении измерений. В расчетах предполагалось, что температура вдоль всего измеряемого участка волокна постоянна.

Максимальная длина волокна, которое можно исследовать методом АБОЧД, ограничена шагом дискретизации частоты Δf_m , с которым определяется передаточная функция. Поэтому максимальная длина волокна и пространственное разрешение АБОЧД сенсора будут соответственно:

$$L_{\max} = \frac{c}{2\pi\Delta f_m}, \quad \Delta z = \frac{c}{2\pi(f_{m,\max} - f_{m,\min})},$$

где $f_{m,\max}$ и $f_{m,\min}$ – максимальная и минимальная частоты модуляции соответственно.

При шаге дискретизации $\Delta f_m = 4,6$ кГц максимальная длина волокна составляет 10 км. При $f_{m,\max} = 800$ МГц и $f_{m,\min} = 10$ Гц, пространственное разрешение сенсора вдоль волоконно-оптической линии составляет 0,06 м. Шаг дискретизации выбирается из условия технической реализуемости и требуемого времени измерений.

Для того, чтобы зарегистрировать изменение передаточной функции Δs , соответствующее изменению деформации волокна на ϵ , необходимо, чтобы это изменение превосходило шум регистрирующей аппаратуры на участке деформированного волокна l (рисунок 4).

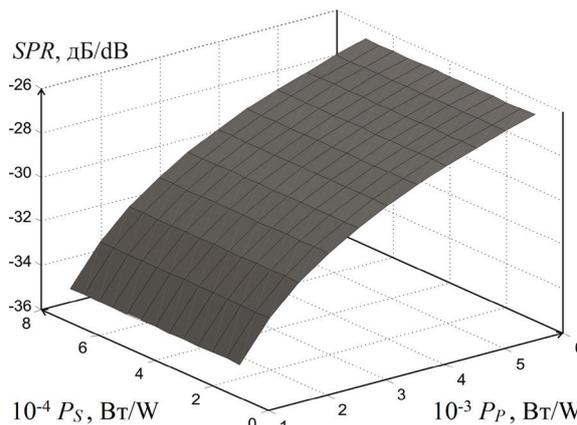


Рисунок 4 – Зависимость соотношения полезный сигнал–максимальный отклик SPR от мощности излучения накачки P_p и мощности пробного излучения P_s

Figure 4 – Dependence of signal to maximum pulse ratio SPR on pump radiation power P_p and probe radiation power P_s

Для оценки влияния мощности излучения на величину передаточной функции воспользуемся параметром SPR , который представляет собой соотношение полезный сигнал–максимальный отклик (в децибелах):

$$SPR = 10 \lg \left(\frac{\Delta s}{s_{\max}} \right).$$

Была исследована зависимость SPR от мощности пробного излучения и мощности излучения накачки, а также от глубины модуляции. Показано, что SPR мало зависит от мощности пробного излучения в пределах 10^{-6} – 10^{-4} Вт и от глубины модуляции в пределах 10–100 %. При этом SPR нелинейно возрастает с увеличением мощности излучения накачки (рисунок 4). Таким образом, для получения лучшего пространственного разрешения и большей точности измерений необходимо, чтобы мощность излучения накачки находилась в пределах от 7 до 10 мВт. Дальнейшее увеличение мощности излучения накачки приводит к появлению нелинейных эффектов второго порядка. Модулированное излучение накачки приводит к вторичной модуляции пробного излучения, что вносит большие погрешности в измерение импульсного отклика.

Выходной сигнал фотоприемника зависит также от изменения показателя преломления оптоволокна. В анизотропной среде оптического волокна показатель преломления зависит от направления распространения света и его поляризации. Изменения данной величины

под действием внутренних напряжений, вызываемых давлением, могут быть представлены с помощью изменения эллипсоида показателя преломления. Под действием поперечного внешнего давления p изменение показателя преломления сердцевинны оптического волокна записывается в виде:

$$\Delta n = \frac{n^3 p (p_{11} + p_{12})}{2E_c^2},$$

где p_{11} и p_{12} – коэффициенты Поккельса.

Наибольший интерес вызывает влияние избыточных потерь и изменение показателя преломления вблизи минимума функции отклика в области деформации, вызванной действием силы Ампера. Для расчетов использовались следующие значения: $r = 10$ мкм; $b = 120$ мкм; $\Delta = 2 \cdot 10^3$; $E_c = 6,2 \cdot 10^{10}$ Н/м²; $p = 8 \cdot 10^8$ Н/м²; $p_{11} = 0,121$; $p_{12} = 0,27$. Математическое моделирование функции отклика (рисунок 5) было проведено без учета избыточных потерь и изменения показателя преломления (кривая 1), затем с учетом избыточных потерь (кривая 2), изменения показателя преломления (кривая 3). Кривая 4 представляет собой результат моделирования с учетом избыточных потерь и изменения показателя преломления.

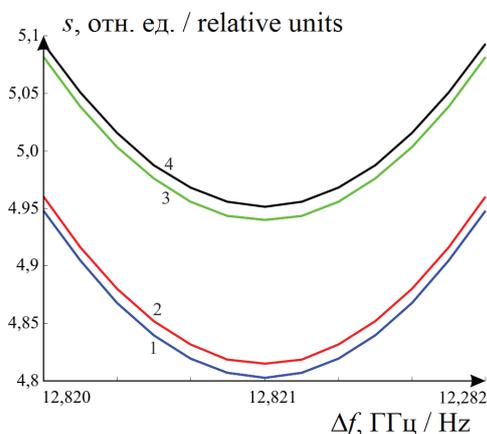


Рисунок 5 – Зависимость передаточной функции s от разности частот Δf : 1 – без учета избыточных потерь и изменения показателя преломления; 2 – с учетом избыточных потерь; 3 – с учетом изменения показателя преломления; 4 – с учетом избыточных потерь и изменения показателя преломления

Figure 5 – The dependence of pulse response s on radiation frequency difference Δf : 1 – excluding excess losses and refraction index change; 2 – including excess losses; 3 – including refraction index change; 4 – including excess losses and refraction index change

Из рисунка 5 следует, что влияние избыточных потерь и изменение показателя преломления вносит незначительную погрешность ($\approx 3\%$) при определении значения функции отклика методом АБОЧД. На определение характеристической частоты ВРМБ, а, следовательно, на определение силы тока эта погрешность влиять не будет. Влияние данных эффектов может возрасти с увеличением числа источников механических напряжений на единицу длины.

Заключение

Представлена принципиальная схема распределенного сенсора силы тока на основе метода анализа бриллюэновского оптического частотного домена. Проведена априорная оценка параметров измерительной системы, исходя из математической модели вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в оптическом волокне. Пространственное разрешение сенсора при определении длины и местоположения участков волокна составляет 0,06 м при использовании амплитудной модуляции оптического сигнала в пределах от 10 ГГц до 800 МГц. Разрешающая способность сенсора составляет 0,22 кА при разности частот излучения накачки и пробного $\Delta f = 500$ кГц, максимальное значение силы тока 25 кА при разности частот излучения накачки и пробного $\Delta f = 50$ МГц.

Исследована зависимость работы сенсора при различных мощностях используемого лазера. Показано, что для получения лучшего пространственного разрешения и большей точности измерений необходимо, чтобы мощность излучения накачки находилась в пределах от 7 до 10 мВт. Рассмотрено влияние изменения показателя преломления оптического волокна на результат измерения.

Дальнейшее исследование будет посвящено устранению влияния повышения температуры оптического волокна на результат измерений.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Фотоника, опто- и микроэлектроника» в 2019 г.

Список использованных источников

1. Бонерт, К. Прорыв в области измерения сильных постоянных токов / К. Бонерт, П. Гугенбах // АББ Ревю. – 2005. – № 1. – С. 6–10.

2. Silva, R.M. Optical current sensors for high power systems: A Review / R.M. Silva, H. Martins, I. Nascimento [et al.] // Applied Sciences. – 2012. – Vol. 2, no. 7. – P. 602–628. DOI: 10.3390/app2030602

3. Zubia, J. Design and development of a low-cost optical current sensor / J. Zubia [et al.] // Sensors. – 2013. – Vol. 13, no. 10. – P. 13584–13595. DOI: 10.3390/s131013584

4. Zhang, H. High-current-sensitivity all-fiber current sensor based on fiber loop architecture / H. Zhang, Y. Qiu, H. Li [et al.] // Optics Express. – 2012. – Vol. 20, no. 17. – P. 18591–18599. DOI: 10.1364/OE.20.018591

5. Zhang, H. A loop all-fiber current sensor based on single-polarization single-mode couplers // H. Zhang, J. Jiang, Y. Zhang [et al.] // Sensors. – 2017. – Vol. 17, no. 11. – P. 2674–2679. DOI: 10.3390/s17112674

6. Wang, Z. Effect of modulation error on all optical fiber current transformers / Z. Wang, Y. Wang, S. Sun // Journal of Sensor Technology. – 2012. – No. 2. – P. 172–176. DOI: 10.4236/jst.2012.24024

7. Watekar, P.R. Development of a highly sensitive compact sized optical fiber current sensor / P.R. Watekar, S. Ju, S.A. Kim [et al.] // Optics Express. – 2010. – Vol. 18, no. 16. – P. 17096–17105. DOI: 10.1364/OE.18.017096

8. Liu, T. Optical current sensor with dual-wavelength configuration for improving temperature robustness / T. Liu, J. Han, H. Hu // IEEE Photonics Journal. – 2017. – Vol. 9, no. 1. – P. 210–221. DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2639286

9. Bilro, L. Optical sensors based on plastic fibers / L. Bilro, N. Alberto, J.L. Pinto // Sensors. – 2012. – Vol. 12, no. 8. – P. 12184–12207. DOI: 10.3390/s120912184

10. Barczak, K. Optical fibre current sensor for electrical power engineering / K. Barczak // Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences. – 2011. – Vol. 59, no. 4. – P. 409–414. DOI: 10.2478/v10175-011-0049-3

11. Bao, X. Combined distributed temperature and strain sensor based on Brillouin loss in an optical fiber / X. Bao, D.J. Webb, D.A. Jackson // Optics Letters. – 1994. – Vol. 19. – P. 141–143. DOI: 10.1364/OL.19.000141

12. Yanukovich, T.P. Numerical model of three-wave Brillouin scattering in an optical fiber. Journal of Optical Technology. – 2002. – Vol. 69, no. 7. – P. 518–523. DOI: 10.1364/JOT.69.000518

13. Янукович, Т.П. Метод диагностики протяженных волоконно-оптических линии с использованием анализа Бриллюэновского оптического частотного домена / Т.П. Янукович, А.В. Поляков // Известия РАН. Серия физическая. – 2006. – Т. 70, № 9. – С. 1267–1271.

Acknowledgments

The work was performed as part of the implementation of the Belarusian National Research Programs "Photonics, opto- and microelectronics" in 2019.

References

1. Bonert K., Gugenbah P. [Breakthrough in the field of measuring strong direct currents]. *ABB Review*, 2005, no. 1, pp. 6–10 (in Russian).

2. Silva R.M., Martins H., Nascimento I., Baptista J.M., Ribeiro A.L., Santos J.L., Jorge P., Frazao O. Optical current sensors for high power systems: A Review. *Applied Sciences*, 2012, vol. 2, no. 7, pp. 602–628. DOI: 10.3390/app2030602

3. Zubia J. Design and development of a low-cost optical current sensor. *Sensors*, 2013, vol. 13, no. 10, pp. 13584–13595. DOI: 10.3390/s131013584

4. Zhang H., Qiu Y., Li H., Huang A., Chen H., Li G. High-current-sensitivity all-fiber current sensor based on fiber loop architecture. *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 17, pp. 18591–18599. DOI: 10.1364/OE.20.018591

5. Zhang H., Jiang J., Zhan Y., Chen H., Zhao N., Lin L., Qiu Y. A loop all-fiber current sensor based on single-polarization single-mode couplers. *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 11, pp. 2674–2679. DOI: 10.3390/s17112674

6. Wang Z., Wang Y., Sun S. Effect of modulation error on all optical fiber current transformers. *Journal of Sensor Technology*, 2012, no. 2, pp. 172–176. DOI: 10.4236/jst.2012.24024

7. Watekar P.R., Ju S., Kim S.A., Jeong S., Kim Y., Han W.T. Development of a highly sensitive compact sized optical fiber current sensor. *Optics Express*, 2010, vol. 18, no. 16, pp. 17096–17105. DOI: 10.1364/OE.18.017096

8. Liu T., Han J., Hu H. Optical current sensor with dual-wavelength configuration for improving temperature robustness. *IEEE Photonics Journal*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 210–221. DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2639286

9. Bilro L., Alberto N., Pinto J.L. Optical sensors based on plastic fibers. *Sensors*, 2012, vol. 12, no. 8, pp. 12184–12207. DOI: 10.3390/s120912184

10. Barczak K. Optical fibre current sensor for electrical power engineering. Bulletin of the Polish Academy of Sciences. *Technical Sciences*, 2011, vol. 59, no. 4, pp. 409–414.

DOI: 10.2478/v10175-011-0049-3

11. Bao X., Webb D.J., Jackson D.A. Combined distributed temperature and strain sensor based on Brillouin loss in an optical fiber. *Optics Letters*, 1994, vol. 19, pp. 141–143. **DOI:** 10.1364/OL.19.000141

12. Yanukovich T.P. Numerical model of three-wave Brillouin scattering in an optical fiber. *Journal of Optical Technology*, 2002, vol. 69, no. 7, pp. 518–523.

DOI: 10.1364/JOT.69.000518

13. Yanukovich T.P., Polyakov A.V. Diagnostic method for extended fiber lines using Brillouin optical frequency-domain analysis. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics], 2006, vol. 70, no. 9, pp. 1267–1271.

УДК 621.382.33; 539.21

Контроль дифференциального сопротивления p – n -переходов биполярного транзистора в активном режиме методом импедансной спектроскопии

Н.И. Горбачук¹, Н.А. Поклонский¹, Я.Н. Марочкина¹, С.В. Шпаковский²

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

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
ул. Корженевского, 108, г. Минск 220064, Беларусь

Поступила 01.07.2019

Принята к печати 20.08.2019

Контроль параметров готовых транзисторов и межоперационный контроль при их изготовлении являются необходимыми условия выпуска конкурентоспособных изделий электронной промышленности. Традиционно для контроля биполярных транзисторов используются измерения на постоянном токе и регистрация вольт-фарадных характеристик. Проведение измерений на переменном токе позволит получить дополнительную информацию о параметрах биполярных транзисторов. Цель работы – показать возможности метода импедансной спектроскопии для контроля дифференциального электрического сопротивления p – n -переходов биполярного p – n -транзистора в активном режиме.

Методом импедансной спектроскопии исследован p – n -транзистор КТ814Г производства ОАО «ИНТЕГРАЛ». На переменном токе в интервале частот 20 Hz–30 MHz определены значения дифференциального электрического сопротивления и емкости p – n -переходов база–эмиттера и база–коллектора при постоянных токах базы от 0,8 до 46 μ A.

Результаты работы могут быть использованы при отработке методик выходного контроля дискретных биполярных полупроводниковых приборов.

Ключевые слова: импедансная спектроскопия, транзистор, неравновесные электроны и дырки, p – n -переход, область пространственного заряда.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-253-262

Адрес для переписки:

Н.И. Горбачук
Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: gorbachuk@bsu.by

Address for correspondence:

N.I. Gorbachuk
Belarusian State University,
Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: gorbachuk@bsu.by

Для цитирования:

Н.И. Горбачук, Н.А. Поклонский, Я.Н. Марочкина, С.В. Шпаковский
Контроль дифференциального сопротивления p – n -переходов
биполярного транзистора в активном режиме методом импедансной
спектроскопии.

Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 3. – С. 253–262.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-253-262

For citation:

N.I. Gorbachuk, N.A. Poklonski, Ya.N. Marochkina, S.V. Shpakovski
[Controlling of Differential Resistance of p – n -Junctions of Bipolar
Transistor in Active Mode by Method of Impedance Spectroscopy].
Devices and Methods of Measurements.

2019, vol. 10, no. 3, pp. 253–262 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-253-262

Controlling of Differential Resistance of p – n -Junctions of Bipolar Transistor in Active Mode by Method of Impedance Spectroscopy

N.I. Gorbachuk¹, N.A. Poklonski¹, Ya.N. Marochkina¹, S.V. Shpakovski²

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

²JSC “INTEGRAL”,
ul. Kazintsya, 121A, Minsk, 220108 Belarus

Received 01.07.2019

Accepted for publication 20.08.2019

Abstract

Controlling of parameters of manufactured transistors and interoperational controlling during their production are necessary conditions for production of competitive products of electronic industry. Traditionally for controlling of bipolar transistors the direct current measurements and registration of capacity-voltage characteristics are used. Carrying out measurements on alternating current in a wide interval of frequencies (20 Hz–30 MHz) will allow to obtain additional information on parameters of bipolar transistors. The purpose of the work is to show the possibilities of the method of impedance spectroscopy for controlling of differential resistance of p – n -junctions of the bipolar p – n - p -transistor in active mode.

The KT814G p – n - p -transistor manufactured by JSC “INTEGRAL” was studied by the method of impedance spectroscopy. The values of differential electrical resistance and capacitance for base–emitter and base–collector p – n -junctions are defined at direct currents in base from 0.8 to 46 μ A.

The results of the work can be applied to elaboration of techniques of final checking of discrete bipolar semiconductor devices.

Keywords: impedance spectroscopy, transistor, nonequilibrium electrons and holes, p – n -junction, space charge region.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-253-262

Адрес для переписки:

Н.И. Горбачук
Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: gorbachuk@bsu.by

Address for correspondence:

N.I. Gorbachuk
Belarusian State University,
Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: gorbachuk@bsu.by

Для цитирования:

Н.И. Горбачук, Н.А. Поклонский, Я.Н. Марочкина, С.В. Шпаковский
Контроль дифференциального сопротивления p – n -переходов
биполярного транзистора в активном режиме методом импедансной
спектроскопии.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 3. – С. 253–262.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-253-262

For citation:

N.I. Gorbachuk, N.A. Poklonski, Ya.N. Marochkina, S.V. Shpakovski
[Controlling of Differential Resistance of p – n -Junctions of Bipolar
Transistor in Active Mode by Method of Impedance Spectroscopy].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 3, pp. 253–262 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-253-262

Введение

Контроль параметров готовых транзисторов и межоперационный контроль при их изготовлении являются необходимыми условиями выпуска конкурентоспособных изделий электронной промышленности [1]. Традиционно для проверки функционирования готовых биполярных транзисторов используются измерения на постоянном токе (регистрация входных и выходных характеристик, измерение значений напряжений пробоя, регистрация вольт-амперных характеристик (ВАХ) переходов эмиттер–база и база–коллектор) [2]. Для установления распределения примеси используется регистрация вольт-фарадных характеристик (ВФХ) [2, 3].

Важным параметром, определяющим функционирование биполярных транзисторов в электронных устройствах, является напряжение насыщения эмиттер–коллектор [4]. На его значение влияет как активное сопротивление области коллектора, так и эффективность экстракции неравновесных носителей заряда из базы и, соответственно, параметры области пространственного заряда перехода база–коллектор [1, 2, 4]. Перечисленные выше методы позволяют получить лишь косвенные данные о влиянии неравновесных носителей заряда на активное сопротивление области пространственного заряда перехода база–коллектор. Использование импульсных методов, в частности, основанных на наблюдении зависимостей напряжения (тока) от времени при переключении p – n -переходов транзистора с прямого напряжения на обратное, позволяет исследовать переходные процессы и оценить динамику расщепления неравновесных носителей заряда [5], однако не дает возможности проводить мониторинг работы транзистора в активных режимах, близких к используемым в реальных электронных приборах.

Методика импедансной спектроскопии, основанная на проведении измерений в широком интервале частот, традиционно используется в электрохимии и физике гетерогенных систем [6–10]. Применительно к барьерным структурам полупроводниковой электроники она позволяет оценить параметры структурных элементов, не прибегая к нарушению целостности полупроводниковых приборов [10–12], т. е. пригодна для проведения выходного контроля их параметров.

Цель работы – показать возможности метода импедансной спектроскопии для контроля дифференциального электрического сопротивления p – n -переходов биполярного p – n - p -транзистора в активном режиме.

Исследуемые структуры

Исследовались p – n - p -транзисторы КТ814Г производства ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». Транзисторы изготавливались на пластинах (111) монокристаллического кремния p -типа проводимости, выращенного методом Чохральского. Удельное сопротивление кремния при комнатной температуре – $0,005 \Omega \cdot \text{cm}$ (КДБ-0,005). На пластинах наращивался эпитаксиальный слой кремния p -типа с удельным сопротивлением $10 \Omega \cdot \text{cm}$. Толщина эпитаксиального слоя составляла $d \approx 23 \mu\text{m}$. Область базы n -типа формировалась ионной имплантацией фосфора с последующей термической разгонкой ($T = 1150 \text{ }^\circ\text{C}$). Область эмиттера p^+ -типа создавалась диффузией бора ($T = 1050 \text{ }^\circ\text{C}$). Финальный термический отжиг проводился при температуре $T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Глубина залегания перехода база–коллектор – $x_C \approx 2,8 \mu\text{m}$; глубина перехода эмиттер–база – $x_E \approx 2 \mu\text{m}$. Площадь перехода база–коллектор составляла $\approx 0,6 \text{ mm}^2$, перехода эмиттер–база – $\approx 0,3 \text{ mm}^2$. Схематическое изображение сечения транзистора плоскостью, перпендикулярной плоскости пластины показано на рисунке 1а. Барьерная емкость перехода эмиттер–база транзистора, измеренная в отсутствие постоянного напряжения смещения, составила $C_E = 230 \pm 10 \text{ pF}$, барьерная емкость перехода база–коллектор $C_C = 95 \pm 5 \text{ pF}$. Величина барьерной емкости практически не зависела от частоты в интервале $20 \text{ Hz} - 30 \text{ MHz}$. Омические контакты формировались напылением алюминия толщиной $1,2 \mu\text{m}$. Пластины разделялись на чипы. Площадь чипа составила $1,1 \times 1,1 \text{ mm}^2$. Чипы транзисторов размещались в корпусе КТ-27.

Методика проведения измерений

Для проведения измерений выводы базы и коллектора транзистора соединялись друг с другом через резистор сопротивлением R_1 . Таким образом, исследуемые структуры представляли собой двухполюсник, в котором параллельно переходу база–коллектор подсоединен резистор. Схема двухполюсника приведена на рисунке 1б.

Использование резистора R_1 позволяло устранить неконтролируемое влияние на результаты измерений электрического потенциала на базе. Варьирование сопротивления резистора дает возможность изменять ток базы, что может представлять интерес для дальнейших исследований и развития предлагаемых в работе методов контроля параметров биполярных транзисторов. Использовались резисторы с сопротивлением: 3,3 МΩ, 1,2 МΩ, 370 кΩ, 160 кΩ, 97 кΩ. В диапазоне от $f=20$ Hz до $f=30$ MHz активное сопротивление резисторов практически не зависело от частоты переменного тока, а индуктивность не превышала 10 нН.

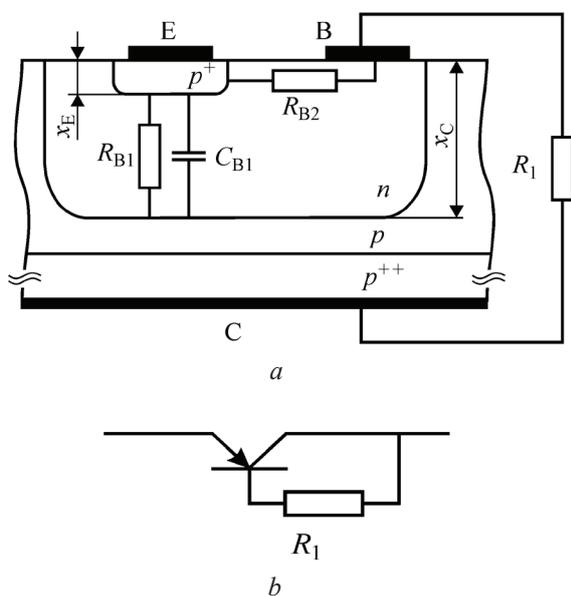


Рисунок 1 – Схематическое изображение сечения исследуемого транзистора плоскостью, перпендикулярной пластине, (a) и электрическая схема двухполюсника (b). Масштаб не соблюден

Figure 1 – Schematic section of studied transistor by a plane, perpendicular to the wafer (a), and circuit diagram of two-terminal device (b). Figure not drawn to scale

Измерение зависимостей действительной Z' и мнимой Z'' частей импеданса $Z = Z' + iZ''$ от частоты f переменного тока проводились на измерителях *LCR Agilent E4980A* и *Agilent 4285A* в диапазоне от 20 Hz до 30 MHz. Амплитуда синусоидального напряжения не превышала 40 мВ. Расчет емкости структуры C проводился по стандартной методике [6]. Все измерения выполнялись при комнатной температуре. Погрешность измерения действительной Z' и мнимой Z'' частей импеданса не превышала 3 %.

Одновременно с переменным измерительным сигналом к структуре прикладывалось постоянное напряжение смещения U_{dc} . В соответствии со схемой, представленной на рисунке 1b, напряжение смещения, прикладываемое к двухполюснику, равно постоянному напряжению коллектор–эмиттер транзистора $U_{dc} = U_{CE}$. Напряжение смещения варьировалось в интервале от 0 до 40 V. При этом величина постоянного тока I_{dc} через структуру изменялась от 0 до 17 mA. Ток I_{dc} двухполюсника равен постоянной составляющей тока эмиттера транзистора: $I_{dc} = I_E$.

Контроль величины постоянной составляющей тока базы I_B для используемых в эксперименте значений напряжения $U_{dc} = U_{CE}$ и сопротивлений резисторов R_1 проводился независимо по стандартной методике [2]. Значения постоянной составляющей тока базы приведены в таблицах 1 и 2. Погрешность измерения I_B не превышала 5 %.

Результаты эксперимента и их обсуждение

На рисунке 2a представлены зависимости действительной части импеданса Z' от частоты f переменного тока. Номера кривых на рисунке соответствуют номерам в таблице 1. Измерения выполнены для $R_1 = 370$ кΩ. В процессе измерений варьировалось $U_{dc} = U_{CE}$. Ток базы ограничивался резистором R_1 .

Таблица 1/ Table 1

Значения постоянного напряжения эмиттер–коллектор $U_{CE} = U_{dc}$, постоянных токов эмиттера $I_E = I_{dc}$ и базы I_B

Values of emitter–collector direct current voltage $U_{CE} = U_{dc}$ and direct currents of emitter $I_E = I_{dc}$ and base I_B

Номер кривой на рисунках 2, 3 Curve number in Figures 2, 3	$U_{CE} = U_{dc}$, V	$I_E = I_{dc}$, μA	I_B , μA
#1	0,695	49,8	0,53
#2	0,792	76,2	0,75
#3	0,986	128	1,25
#4	1,47	267	2,51
#5	4,87	1300	11,7
#6	19,4	6480	51,2

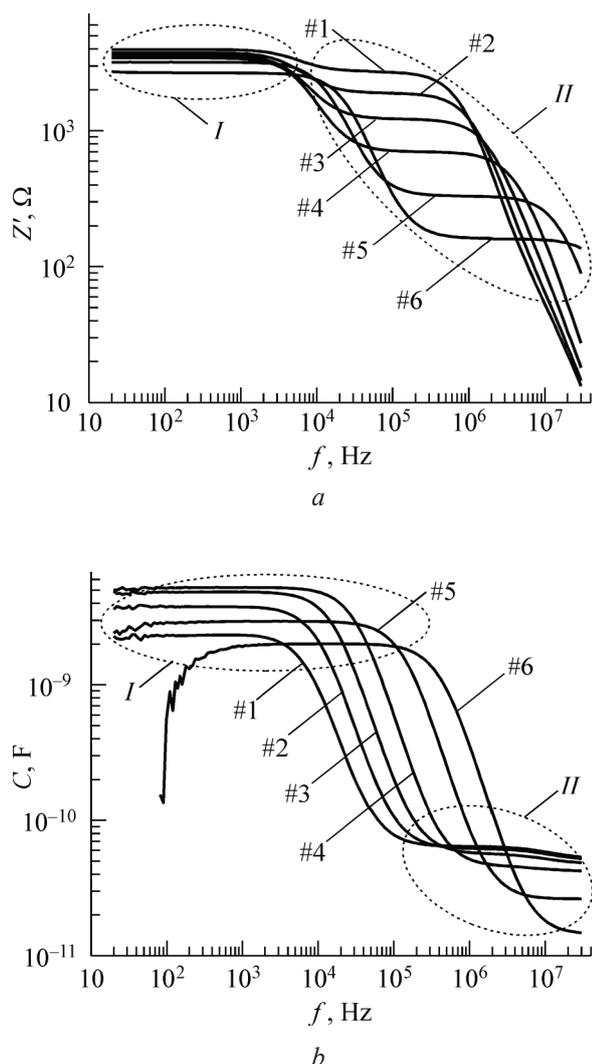


Рисунок 2 – Зависимости действительной части импеданса Z' (a) и емкости C (b) от частоты f переменного тока. Номера кривых соответствуют номерам в таблице 1. $R_1 = 370 \text{ k}\Omega$

Figure 2 – Dependences of real part of impedance Z' (a) and capacitance C (b) on frequency f of alternating current. Curve numbers correspond to numbers in Table 1. $R_1 = 370 \text{ k}\Omega$

Из данных, представленных на рисунке 2a, следует, что в активном режиме (напряжение на переходе база–эмиттер $\geq 0,7 \text{ V}$) зависимости $Z'(f)$ имеют следующие характерные особенности: на каждой из них присутствуют два «плато» (низко- и высокочастотное), в пределах которых Z' практически не зависит от частоты переменного тока, и наблюдаются два участка дисперсионного спада Z' . Участки, в пределах которых нет зависимости Z' от f , на рисунке выделены пунктирным овалом и обозначены *I* (для низких частот) и *II* (для высоких). По мере

увеличения напряжения смещения происходит незначительное снижение значений Z' в области *I* и существенное (до порядка величины) уменьшение Z' в области *II*. При этом участки дисперсионного спада действительной части импеданса сдвигаются в сторону высоких частот.

На рисунке 2b представлены зависимости емкости C от частоты f переменного тока. Также, как и на зависимостях $Z'(f)$, на зависимостях $C(f)$ наблюдается два «плато», в пределах которых емкость практически не зависит от частоты. «Плато» связаны друг с другом участком дисперсионного спада C . В интервале напряжений $U_{dc} = U_{CE}$ от 0,7 до 1,5 V наблюдается увеличение емкости в области низкочастотного «плато». Для $U_{dc} > 1,5 \text{ V}$ низкочастотные значения C уменьшаются при увеличении U_{dc} . В области высоких частот емкость практически не зависит от U_{dc} в интервале 0,7–1,5 V и снижается при более высоких напряжениях. Участок дисперсионного спада C сдвигается в сторону высоких частот при увеличении U_{dc} .

Основываясь на данных, показанных на рисунке 2, можно построить эквивалентную схему замещения, частотные зависимости импеданса которой были бы максимально близки к наблюдаемым для исследуемой структуры. Согласно [6, 12, 13], наличие нескольких «плато» на зависимостях $Z'(f)$ отвечает присутствию в исследуемых системах объектов с отличающимися временами релаксации $\tau = RC$. Соответственно, эквивалентная схема замещения должна содержать как минимум два конденсатора, а на годографах импеданса должны наблюдаться две полуокружности [6, 12]. На рисунке 3 приведены годографы импеданса для нескольких значений U_{dc} . Четко выделяются две полуокружности, что подтверждает данные рисунка 2. Условие $\omega\tau = 1$ (где $\tau = RC$ – постоянная времени релаксации, $\omega = 2\pi f$) определяет частоту, при которой на годографах наблюдается максимум.

Для нашего случая объектами, обладающими и емкостными, и резистивными свойствами, могут быть переходы (области пространственного заряда) эмиттер–база, база–коллектор, а также электронейтральные области базы и эмиттера. Для p – n -переходов постоянная τ определяется активным (дифференциальным) сопротивлением переходов и барьерной (диффузионной) емкостью. Для электронейтральных областей базы, эмиттера и коллектора в отсутствие инжекции $\tau = \rho\epsilon_0\epsilon_0$,

где ρ – удельное электрическое сопротивление; $\epsilon_r = 11,5$ – относительная диэлектрическая проницаемость кремния; ϵ_0 – электрическая постоянная. Для $\rho = 10 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ имеем $\tau \approx 10 \text{ ps}$, что соответствует частоте $f \approx 0,1 \text{ THz}$. Поэтому в первую очередь на величину импеданса измеряемого двухполюсника оказывают влияние области пространственного заряда переходов эмиттер–база, база–коллектор.

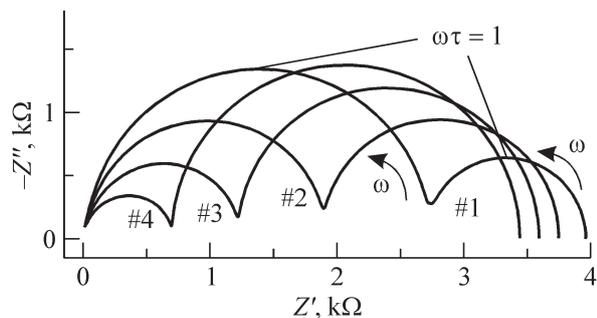


Рисунок 3 – Годографы импеданса $Z = Z' + iZ''$. Номера кривых соответствуют номерам в таблице 1

Figure 3 – Nyquist diagram for impedance $Z = Z' + iZ''$. Curve numbers correspond to numbers in Table 1

Эквивалентная схема замещения представлена на рисунке 4а. Она включает: R_E , C_E – активное сопротивление и емкость (барьерная и/или диффузионная) перехода эмиттер–база, R_C , C_C – активное сопротивление и емкость (барьерная и/или диффузионная) перехода база–коллектор, R_1 – сопротивление резистора, соединяющего выводы базы и коллектора. В схему введены R_{B1} и C_{B1} , R_{B2} отвечающие сопротивлению и емкости активной и сопротивлению пассивной областей базы. Сопротивление R_{B1} шунтирует последовательно включенные R_{B2} и R_1 . В случае, когда переход эмиттер–база закрыт и токи I_{dc} малы, возможно также шунтирование сопротивлений R_{B2} и R_1 емкостью C_{B1} .

Очевидно [1, 2], что увеличение напряжения смещения U_{dc} от 0 до 0,7 V снижает потенциальный барьер перехода эмиттер–база, вызывает инжекцию неравновесных носителей заряда в базу, что сопровождается уменьшением активного сопротивления перехода эмиттер–база, а также увеличением его емкости C_E . Для измеряемого двухполюсника емкость возрастает от значений барьерной емкости перехода эмиттер–база ($C_E = 230 \pm 10 \text{ pF}$ при $U_{dc} = 0 \text{ V}$) до единиц нанофард. Подобные значения типичны [2] для диффузионной емкости прямосмещенных p – n -переходов примерно с такими же площадями и

уровнями легирования p - и n -областей. Это, а также то, что большая эффективная площадь активной области базы позволяет включенным параллельно R_{B1} и C_{B1} шунтировать резистор R_1 и сопротивление пассивной области базы R_{B2} , дает возможность считать низкочастотные «плато» (см. рисунки 2 а и б) на зависимостях $Z'(f)$ и $C(f)$ соответствующими действительной части импеданса и емкости перехода эмиттер–база.

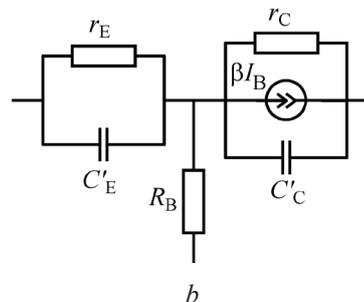
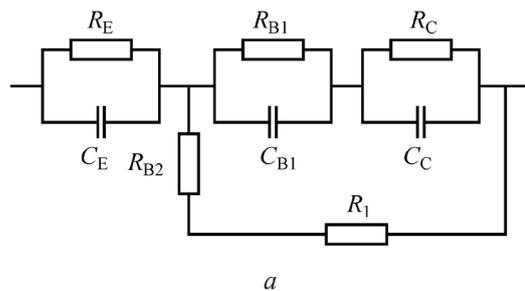


Рисунок 4 – Эквивалентная схема исследуемого биполярного транзистора (а) и простейшая малосигнальная схема транзистора (б)

Figure 4 – Equivalent circuit of studied bipolar transistor (а) and simplest low-signal scheme of transistor (б)

Увеличение тока инжекции дырок в базу при росте U_{dc} приводит к увеличению тока через переход база–коллектор, что эквивалентно уменьшению его активного сопротивления. Значения Z' в области «плато», наблюдаемых на зависимостях $Z'(f)$ в интервале частот 10^5 – 10^7 Hz , также уменьшаются при увеличении U_{dc} . Так как сопротивление коллектора достаточно мало (постоянная времени $\tau \approx 10 \text{ ps}$), то можно считать, что высокочастотное плато соответствует p – n -переходу база–коллектор.

В значения постоянных времен $\tau_E = R_E C_E$ и $\tau_C = R_C C_C$, определяющих максимум на годографах импеданса и граничную частоту дисперсионного спада [6, 12–16] на зависимостях $Z'(f)$ и $C(f)$, вносит вклад не только изменение активных составляющих импеданса, но и емкостных.

В активном режиме при малых постоянных токах емкость прямосмещенного перехода эмиттер–база превышает емкость обратносмещенного перехода коллектор–база. Для прямосмещенного перехода эмиттер–база рост емкости определяется увеличением и барьерной и диффузионной составляющей. Для обратносмещенного перехода база–коллектор наблюдается снижение C (в области высоких частот II , для $U_{dc} > 1,5$ В) вызвано уменьшением барьерной емкости за счет расширения области пространственного заряда перехода база–коллектор при увеличении U_{dc} .

Наблюдаемые закономерности позволяют провести сопоставление эквивалентной схемы замещения со стандартной малосигнальной моделью транзистора [2] и установить соответствие между их элементами. Простейшая малосигнальная модель транзистора показана на рисунке 4*b*. Она включает: r_E, C'_E – дифференциальное сопротивление и емкость (барьерная и/или диффузионная) перехода эмиттер–база; r_C, C'_C – дифференциальное сопротивление и емкость (барьерная и/или диффузионная) перехода база–коллектор; R_B – сопротивление базы; βI_B – источник тока, соответствующий току экстрагируемых из перехода база–коллектор носителей заряда; $\beta = h_{21e}$ – коэффициент передачи тока базы.

В нашем случае исследуется пассивный двухполустник и рассматриваются частотные зависимости его импеданса, поэтому в эквивалентной схеме замещения (рисунок 4*a*) источника тока нет. Малосигнальная модель содержит две параллельные RC -цепи, при этом можно считать, что $r_E \approx R_E; C_E \approx C'_E$ и $r_C \approx R_C; C_C \approx C'_C$. Сопротивлению базы R_B , входящему в малосигнальную модель, соответствует сумма сопротивлений активной и пассивной частей базы R_{B1} и R_{B2} .

Таким образом данные, представленные на рисунке 2, и рассмотренные модели дают основание полагать что, значения Z' , соответствующие «плато» на зависимостях $Z'(f)$ в области низких частот (область I), приближенно равны дифференциальным сопротивлениям переходов эмиттер–база и база–коллектор: $Z' \approx r_E + r_C$; в области высоких частот (область II): $Z' \approx r_C$.

Полученные результаты были проверены в дополнительной серии измерений частотных зависимостей импеданса двухполустника. В данной серии поддерживалось постоянное значение $U_{dc} = U_{CE} = 3,00 \pm 0,04$ В. Величина тока базы изменялась с помощью варьирования сопротивления резистора R_1 , соединяющего выводы базы

и коллектора. Значения токов эмиттера $I_E = I_{dc}$ и базы I_B представлены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Значения постоянных токов эмиттера I_E и базы I_B

Values of direct currents of emitter I_E and base I_B

Номер кривой на рисунках 5, 6	$I_E = I_{dc}, \mu\text{A}$	$I_B, \mu\text{A}$
Curve number in Figures 5 and 6		
#1b	113	0,78
#2b	197	2,10
#3b	702	6,74
#4b	1460	16,3
#5b	2340	24,4
#6b	4650	45,9

На рисунке 5*a* показаны зависимости действительной части импеданса Z' от частоты f переменного тока. Номера кривых на рисунке соответствуют номерам в таблице 2. По значениям Z' в области низких (на рисунке 5*a* выделена пунктирным овалом и обозначена I) и высоких частот (обозначена II) видно, что увеличение тока базы (при постоянных значениях $U_{CE} = 3,00 \pm 0,04$ В) приводит к одинаково значимым изменениям дифференциального сопротивления переходов эмиттер–база r_E и база–коллектор r_C . Соответствующие изменения претерпевают и годографы импеданса. Для примера на рисунке 6 показаны два годографа, построенные по результатам измерений при токах базы $I_B = 2,10 \mu\text{A}$ (кривая #2b) и $6,74 \mu\text{A}$ (#3b).

На рисунке 5*b* представлены зависимости емкости C двухполустника от частоты f переменного тока. Увеличение тока базы сопровождается немонотонными изменениями емкости прямосмещенного перехода база–эмиттер. Возможно, это связано со сложной геометрией базы и особенностями накопления заряда в ней. Отметим, что для значений $I_B \geq 45 \mu\text{A}$ при частотах $f < 50$ Нз наблюдался положительный угол сдвига фаз между колебаниями тока и напряжения, что характерно для импеданса индуктивного типа. Причиной этого может быть недостаточная эффективность экстракции носителей заряда из базовой области. На рисунке 5*b* это проявляется в наличии низкочастотного участка роста C .

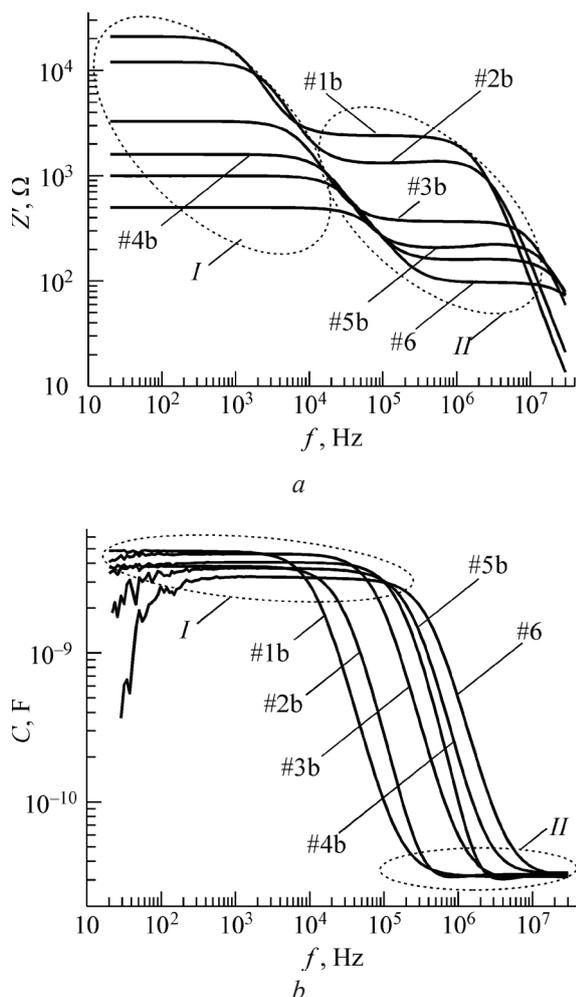


Рисунок 5 – Зависимости действительной части импеданса $Z'(a)$ и емкости $C(b)$ от частоты f переменного тока. Номера кривых соответствуют номерам в таблице 2

Figure 5 – Dependences of real part of impedance $Z'(a)$ and capacitance $C(b)$ on frequency f of alternating current. Curve numbers correspond to numbers in Table 2

В отличие от данных, представленных на рисунке 2b, емкость двухполюсника в области высоких частот (II) практически не зависит от тока базы. Это может рассматриваться как дополнительное подтверждение правомерности отождествления C двухполюсника в области высоких частот с емкостью перехода база–коллектор. Переход смещен в обратном направлении, его барьерная емкость существенно меньше емкости перехода эмиттер–база. При малых токах она определяется разностью потенциалов на коллекторном переходе, которая в случае поддержания на заданном уровне напряжения коллектор эмиттер $U_{dc} = U_{CE} \approx 3$ В, слабо зависит от тока базы.

В таблице 3 приведены значения дифференциальных сопротивлений и емкостей p – n -переходов, полученные по модели двухполюсника (рисунок 1b) из анализа результатов дополнительной серии измерений (см. рисунок 5).

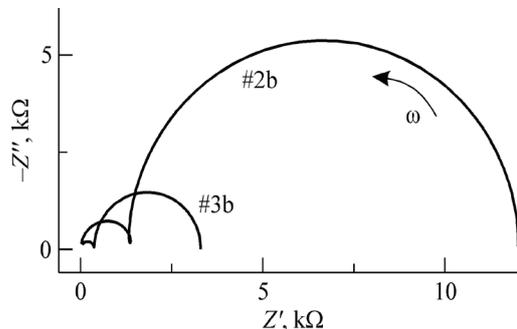


Рисунок 6 – Годографы импеданса $Z = Z' + iZ''$. Номера кривых соответствуют номерам в таблице 2

Figure 6 – Nyquist diagrams for impedance $Z = Z' + iZ''$. Curve numbers correspond to numbers in Table 2

Таблица 3/ Table 3

Значения дифференциального сопротивления переходов эмиттер–база r_E , база–коллектор r_C и соответствующие емкости C_E и C_C двухполюсника (согласно рисунку 1)

Values of differential resistance of junctions for emitter–base r_E , base–collector r_C and corresponding capacitances C_E and C_C of two-terminal device (according to Figure 1)

I_B , μA	r_E , k Ω	r_C , Ω	C_E , nF	C_C , pF
0,78	$18,6 \pm 0,6$	2410 ± 70	$4,81 \pm 0,24$	$31,7 \pm 1,6$
2,10	$10,7 \pm 0,4$	1330 ± 40	$3,81 \pm 0,20$	$32,5 \pm 1,6$
6,74	$2,90 \pm 0,1$	368 ± 10	$4,61 \pm 0,23$	$32,3 \pm 1,6$
16,3	$1,38 \pm 0,05$	210 ± 6	$4,10 \pm 0,21$	$32,5 \pm 1,6$
24,4	$0,84 \pm 0,03$	161 ± 5	$3,71 \pm 0,19$	$33,4 \pm 1,7$
45,9	$0,400 \pm 0,015$	97 ± 3	$3,22 \pm 0,16$	$32,6 \pm 1,6$

Расчеты выполнены с учетом того, что на эквивалентной схеме замещения RC -цепи эмиттера ($R_E C_E$), базы ($R_{B1} C_{B1}$) и коллектора ($R_C C_C$) соединены последовательно. Тогда в области низкочастотного плато (область I): $Z' \approx R_E + R_{B1} + R_C$. Так как $R_{B1} \ll R_E$ и $R_{B1} \ll R_C$, то: $Z' \approx R_E + R_C \approx r_E + r_C$. В области II: $Z' \approx R_C \approx r_C$. Для емкостей: $C \approx C_E \approx C'_E$ – в области низкочастотного плато и $C \approx C_C \approx C'_C$ – для высоких частот (область II). Закономерности, прослеживаемые по данным таблицы 3 и на рисунках 5, 6, согласуются с существующими представлениями

о физике работы биполярных транзисторов [1, 2] и подтверждают результаты, представленные на рисунках 2, 3. Итак, метод импедансной спектроскопии может использоваться для контроля параметров p - n -переходов биполярного p - n - p -транзистора в активном режиме.

Заключение

Продемонстрированы возможности метода импедансной спектроскопии для определения значений дифференциальных электрических сопротивлений r_E , r_C и емкостей C_E , C_C для p - n -переходов эмиттер–база и база–коллектор биполярного p - n - p -транзистора в активном режиме за один цикл измерений в интервале частот от 20 Hz до 30 MHz. Показана возможность измерения r_E , r_C и C_E , C_C при заданных значениях постоянного тока базы и напряжения на переходе коллектор–эмиттер.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника» и «Физматтех».

Список использованных источников

1. Ng, K.K. Complete guide to semiconductor devices / K.K. Ng. – New York : Wiley, 2002. – xxiv+740 p.
2. Sze, S.M. Semiconductor devices: Physics and technology / S.M. Sze, M.K. Lee. – New York : Wiley, 2012. – x+578 p.
3. Nicollian, E.H. The Si-SiO₂ interface – electrical properties as determined by metal-insulator-silicon conductance technique / E.H. Nicollian, A. Goetzberger // Bell Syst. Tech. J. – 1967. – Vol. 46, no. 6. – P. 1055–1133. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1967.tb01727.x
4. Baumann, P. Parameterextraktion bei Halbleiterbauelementen. Simulation mit PSPICE / P. Baumann. – Wiesbaden : Springer Vieweg, 2019. – x+191 p. DOI: 10.1007/978-3-658-26574-8
5. Poklonski, N.A. Kinetics of reverse resistance recovery of silicon diodes: The role of the distance the metallurgical p^+ - n -junction–defect layer formed by 250 MeV krypton implantation / N.A. Poklonski [et al.] // Physica B. – 2009. – Vol. 404, no. 23–24. – P. 4667–4670. DOI: 10.1016/j.physb.2009.08.129
6. Impedance spectroscopy: Theory experiment, and applications / Ed. by E. Barsoukov, J.R. Macdonald. – Hoboken : Wiley, 2018. – xviii+528 p. DOI: 10.1002/9781119381860
7. Cho, C.-H. Characterization of electronic structure of silicon nanocrystals in silicon nitride by capacitance

spectroscopy / C.-H. Cho [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2010. – Vol. 96, no. 22. – P. 223110 (3 pp.).

DOI: 10.1063/1.3431572

8. Поклонский, Н.А. Электропроводность композиционных материалов на основе мелкодисперсного кремния вблизи перехода диэлектрик–металл / Н.А. Поклонский [и др.] // Неорганические материалы. – 2004. – Т. 40, № 11. – С. 1293–1298.

9. Winterhalter, J. Analysis of admittance data: Comparison of a parametric and a nonparametric method / J. Winterhalter [et al.] // J. Comput. Phys. – 1999. – Vol. 153, no. 1. – P. 139–159.

DOI: 10.1006/jcph.1999.6269

10. Lauwaert, J. A simple correction method for series resistance and inductance on solar cell admittance spectroscopy / J. Lauwaert [et al.] // Sol. Energ. Mat. Sol. C. – 2010. – Vol. 94, no. 6. – P. 966–970.

DOI: 10.1016/j.solmat.2010.01.025

11. 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, no. 6. – P. 813–820.

DOI: 10.1016/j.microrel.2010.02.007

12. Поклонский, Н.А. Эквивалентная схема замещения кремниевых диодов, облученных высокими флюенсами электронов / Н.А. Поклонский [и др.] // ЖТФ. – 2010. – Т. 80, № 10. – С. 74–82.

13. Волков, А.С. Анализ экспериментальных результатов по модели Гавриляка–Негами в диэлектрической спектроскопии / А.С. Волков [и др.] // Оптика и спектроскопия. – 2018. – Т. 124, № 2. – С. 206–209.

14. Kowal, J. Model parameterization of nonlinear devices using impedance spectroscopy / J. Kowal, D. Hente, D.U. Sauer // IEEE T. Instrum. Meas. – 2009. – Vol. 58, no. 7. – P. 2343–2350.

DOI: 10.1109/TIM.2009.2013927

15. Kavasoglu, A.S. Simulation for capacitance correction from Nyquist plot of complex impedance–voltage characteristics / A.S. Kavasoglu, N. Kavasoglu, S. Oktik // Solid-State Electron. – 2008. – Vol. 52, no. 6. – P. 990–996. DOI: 10.1016/j.sse.2008.02.004

16. Campbell, D. Evaluation of possible equivalent circuits for the description of the CV characteristics of heavily irradiated Si diodes / D. Campbell, A. Chilingarov, T. Sloan // Nucl. Instrum. Meth. A. – 2005. – Vol. 552, no. 1–2. – P. 152–157.

DOI: 10.1016/j.nima.2005.06.024

Acknowledgments

The work is supported by the Belarusian National Research Programs “Photonics, opto- and microelectronics” and “Fizmattekh”.

References

1. Ng K.K. Complete Guide to Semiconductor Devices. New York, Wiley, 2002, xxiv+740 p.
2. Sze S.M., Lee M.K. Semiconductor Devices: Physics and Technology, New York, Wiley, 2012, x+578 p.
3. Nicollian E.H., Goetzberger A. The Si-SiO₂ interface – electrical properties as determined by metal-insulator-silicon conductance technique. *Bell Syst. Tech. J.*, 1967, vol. 46, no. 6, pp. 1055–1133.
DOI: 10.1002/j.1538-7305.1967.tb01727.x
4. Baumann P. Parameterextraktion bei Halbleiterbauelementen. Simulation mit PSPICE, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2019, x+191 p.
DOI: 10.1007/978-3-658-26574-8
5. Poklonski N.A., Gorbachuk N.I., Shpakovski S.V., Filipenia V.A., Skuratov V.A., Wieck A. Kinetics of reverse resistance recovery of silicon diodes: The role of the distance the metallurgical p^+n -junction–defect layer formed by 250 MeV krypton implantation. *Physica B*, 2009, vol. 404, no. 23–24, pp. 4667–4670.
DOI: 10.1016/j.physb.2009.08.129
6. Impedance Spectroscopy: Theory Experiment, and Applications, ed. by E. Barsoukov, J.R. Macdonald. Hoboken, Wiley, 2018, xviii+528 p.
DOI: 10.1002/9781119381860
7. Cho C.-H., Kim B.-H., Kim S.-K., Park S.-J. Characterization of electronic structure of silicon nanocrystals in silicon nitride by capacitance spectroscopy. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, vol. 96, no. 22, pp. 223110 (3 pp.).
DOI: 10.1063/1.3431572
8. Poklonskii N.A., Gorbachuk N.I., Pototskii I.V., Trofimchuk D.A. Electrical conductivity of composite materials based on fine-particle silicon near the metal–insulator transition. *Inorg. Mater.*, 2004, vol. 40, no. 11, pp. 1133–1137.
DOI: 10.1023/B:INMA.0000048209.93137.12
9. Winterhalter J., Ebling D.G., Maier D., Honerkamp J. Analysis of admittance data: Comparison of a parametric and a nonparametric method. *J. Comput. Phys.*, 1999, vol. 153, no. 1, pp. 139–159.
DOI: 10.1006/jcph.1999.6269
10. Lauwaert J., Decock K., Khelifi S., Burgelman M. A simple correction method for series resistance and inductance on solar cell admittance spectroscopy. *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, 2010, vol. 94, no. 6, pp. 966–970.
DOI: 10.1016/j.solmat.2010.01.025
11. 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 im-plantated with high-energy Xe ions. *Microelectron. Reliab.*, 2010, vol. 50, no. 6, pp. 813–820. **DOI:** 10.1016/j.microrel.2010.02.007
12. Poklonski N.A., Gorbachuk N.I., Shpakovski S.V., Wieck A. Equivalent circuit of silicon diodes subjected to high-fluence electron irradiation. *Tech. Phys.*, 2010, vol. 55, no. 10, pp. 1463–1471.
DOI: 10.1134/S1063784210100117
13. Volkov A.S., Kuposov G.D., Perfil'ev R.O., Tyagunin A.V. Analysis of experimental results by the Havriliak–Negami model in dielectric spectroscopy. *Opt. Spectrosc.*, 2018, vol. 124, no. 2, pp. 202–205.
DOI: 10.1134/S0030400X18020200
14. Kowal J., Hente D., Sauer D.U. Model parameterization of nonlinear devices using impedance spectroscopy. *IEEE T. Instrum. Meas.*, 2009, vol. 58, no. 7, pp. 2343–2350.
DOI: 10.1109/TIM.2009.2013927
15. Kavasoglu A.S., Kavasoglu N., Oktik S. Simulation for capacitance correction from Nyquist plot of complex impedance–voltage characteristics. *Solid-State Electron.*, 2008, vol. 52, no. 6, pp. 990–996.
DOI: 10.1016/j.sse.2008.02.004
16. Campbell D., Chilingarov A., Sloan T. Evaluation of possible equivalent circuits for the description of the CV characteristics of heavily irradiated Si diodes. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 2005, vol. 552, no. 1–2, pp. 152–157.
DOI: 10.1016/j.nima.2005.06.024

Research of Surface Wear Resistance of Aluminum Alloy Modified with Minerals using Sclerometry Method

A.V. Skazochkin¹, G.G. Bondarenko², P. Żukowski³

¹Kaluga branch of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration,
Okružhnaya str., 4, building 3, Kaluga 248030, Russia
e-mail: avskaz@rambler.ru

²National Research University Higher School of Economics,
Myasnitskaya str., 20, Moscow 101000, Russia

³Lublin University of Technology,
Nadbystrzycka str., 38A, Lublin 20-618, Poland

Received 01.07.2019

Accepted for publication 14.08.2019

Abstract

Improving the wear resistance of the surface of metal parts used in various industries is one of the relevant areas of materials science. The aim of this work was a comparative study of the wear resistance of a sample of an aluminum alloy (EN AW-2024, an aluminum alloy of the Al-Cu-Mg system) modified with ultrafine particles of minerals using the sclerometry method, which makes it possible to measure the physicomachanical properties of the material at the microscale, as well as determining some tribological parameters (hardness and elastic modulus) of a duralumin sample with a mineral coating.

Wear resistance was measured using a NanoScan-4D scanning hardness tester using the multi-cycle friction method using a sapphire sphere with control of the pressing force and the deepening of the tip into the sample. The use of such a measurement system is especially important when testing thin modified layers, when the layer thickness is comparable with the surface roughness parameters and the influence of the substrate is excluded.

The measurement results showed that the wear resistance of the surface of an aluminum alloy sample modified with ultrafine mineral particles increased by more than 12 times compared to the wear resistance of an aluminum alloy surface without modification. Also, measurements of the hardness and elastic modulus of the surface of the modified sample were performed taking into account the features of measuring the mechanical parameters of thin layers.

The obtained parameters of the modified surface of the aluminum alloy can be further used to build models of the processes of friction and wear of the surface modified by ultrafine particles of minerals. The lack of an acceptable explanation of the nature of the special properties of the surface modified by particles of minerals of natural origin does not exclude the use of the observed effects to significantly increase the resource of various parts and mechanisms.

Keywords: surface modification, aluminum alloy, wear resistance, hardness, mineral coatings.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-263-270

Адрес для переписки:

А.В. Сказочкин
Калужский филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы, ул. Окружная, 4, строение 3,
Калуга 248030, Россия
e-mail: avskaz@rambler.ru

Address for correspondence:

A.V. Skazochkin
Kaluga branch of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration,
Okružhnaya str., 4, building 3, Kaluga 248030, Russia
e-mail: avskaz@rambler.ru

Для цитирования:

A.V. Skazochkin, G.G. Bondarenko, P. Żukowski
Research of Surface Wear Resistance of Aluminum Alloy Modified with Minerals using Sclerometry Method.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 3. – С. 263–270.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-263-270

For citation:

A.V. Skazochkin, G.G. Bondarenko, P. Żukowski
Research of Surface Wear Resistance of Aluminum Alloy Modified with Minerals using Sclerometry Method.
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 3, pp. 263–270.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-263-270

Исследование износостойкости поверхности алюминиевого сплава, модифицированного минералами, методом склерометрии

А.В. Сказочкин¹, Г.Г. Бондаренко², П. Жуковский³

¹Калужский филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы,
ул. Окружная 4, строение 3, Калуга 248030, Россия

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
ул. Мясницкая, 20, Москва 101000, Россия

³Люблинский технологический университет,
ул. Надбыстрицкая, 38А, Люблин 20-618, Польша

Поступила 01.07.2019

Принята к печати 14.08.2019

Повышение износостойкости поверхности металлических деталей, используемых в различных отраслях промышленности, является одним из актуальных направлений материаловедения. Целью данной работы являлось сравнительное исследование износостойкости образца из алюминиевого сплава (EN AW-2024, алюминиевый сплав системы Al-Cu-Mg), модифицированного ультрадисперсными частицами минералов с использованием метода склерометрии, позволяющего измерить физико-механические свойства материала в микромасштабе, а также определение некоторых трибологических параметров (твердости и модуля упругости) образца из дюралюминия с минеральным покрытием.

Измерение износостойкости было выполнено с помощью сканирующего твердомера «НаноСкан-4D» методом многоциклового трения сапфировой сферой с контролем силы прижима и углубления наконечника в образец. Использование такой системы измерения особенно важно при испытании тонких модифицированных слоев, когда толщина слоя сопоставима с параметрами шероховатости поверхности и исключено влияние подложки.

Результаты измерений показали, что износостойкость поверхности образца из алюминиевого сплава, модифицированной ультрадисперсными частицами минералов, увеличилась более чем 12 раз по сравнению с износостойкостью поверхности из алюминиевого сплава без модификации. Также выполнены измерения твердости и модуля упругости поверхности модифицированного образца с учетом особенностей измерения механических параметров тонких слоев.

Полученные параметры модифицированной поверхности алюминиевого сплава могут быть в дальнейшем использованы для построения моделей процессов трения и износа поверхности, модифицированной ультрадисперсными частицами минералов. Отсутствие в настоящее время приемлемого объяснения природы особых свойств поверхности, модифицированной частицами минералов природного происхождения, не исключает использования наблюдаемых эффектов для значительного повышения ресурса различных деталей и механизмов.

Ключевые слова: модификация поверхности, алюминиевый сплав, износостойкость, твердость, минеральные покрытия.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-263-270

Адрес для переписки:

А.В. Сказочкин
Калужский филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы, ул. Окружная, 4, строение 3,
Калуга 248030, Россия
e-mail: avskaz@rambler.ru

Address for correspondence:

A.V. Skazochkin
Kaluga branch of the Russian Presidential Academy of National
Economy and Public Administration,
Okruzhnaya str., 4, building 3, Kaluga 248030, Russia
e-mail: avskaz@rambler.ru

Для цитирования:

A.V. Skazochkin, G.G. Bondarenko, P. Żukowski
Research of Surface Wear Resistance of Aluminum Alloy Modified
with Minerals using Sclerometry Method.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 3. – С. 263–270.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-263-270

For citation:

A.V. Skazochkin, G.G. Bondarenko, P. Żukowski
Research of Surface Wear Resistance of Aluminum Alloy Modified
with Minerals using Sclerometry Method.
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 3, pp. 263–270.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-263-270

Introduction

Aluminum alloys are widely used in industrial production due to the combination of physical and mechanical properties that provide sufficient performance characteristics along with low specific gravity [1–2]. Compared to steels and titanium alloys, aluminum alloys have lower hardness, which affects their wear resistance [2]. However, due to its special properties and low cost, aluminum alloys stably occupy the niche of low-inertia parts of various machines. Moreover, the service life of the parts is relatively small, which can lead to problems associated with the need to replace aluminum parts that fail as a result of wear [1–2].

The traditional ways to increase the wear resistance of wearing parts made of aluminum alloys is coating and surface modification [3–8]. Reliable enough ways to create a protective coating on the surface of aluminum and its alloys are chemical and electrochemical oxidation [3], the creation of cermet composite materials with an aluminum matrix hardened by refractory, high-strength ceramic particles [4–6], the technology of arc surfacing [7], the use of laser surface treatment methods [8]. But these methods are ineffective both from the point of view of technical parameters and economically, because they are accompanied by high-temperature heating, limitation of overall dimensions, and brittleness of the resulting layers. Therefore, it is urgent to develop other methods for modifying the surface of aluminum and its alloys with minimal or low thermal impact, in particular, methods of ion implantation, electrospark alloying, and technology of mineral coatings.

The methods that use low-temperature operations to create a modified layer include the so-called technology of mineral coatings [9]. The essence of the technology is to create a modified surface layer with a thickness of 5–30 μm by plastic deformation using ultrasonic and mechanical effects that activate the entry of ultrafine particles of minerals into the metal volume [9–10]. However, currently there are no models that correctly describe the effects that arise when creating layers containing ultrafine particles of minerals. Possible causes of changes in the physical properties of the surface with micro and nanoparticles of minerals are listed in [11]. It should be noted here that the choice of characteristics included in a particular model is determined mainly by the technical capabilities of their measurement. Until now,

the surface parameters of aluminum samples modified with ultrafine particles of minerals remained unknown. This is partly why the real work was done.

There is also the problem of the correctness of the measurement of the physicomechanical properties of thin coatings and thin modified layers, arising due to the presence of factors leading to methodological errors for some methods of measuring wear resistance, hardness, and elastic modulus [12–13]. The most significant factors are surface roughness, residual stresses, and the effect of the substrate [14]. The effect of the substrate or the bulk of the base metal is that for the system a modified layer–the base metal–the recorded response of the material during measurement depends on the properties of the layer and the properties of the volume of the metal [14, 15].

The possibility of avoiding some of the shortcomings listed above when measuring wear resistance, along with other methods, is provided by the use of the multi-cycle friction method with a sapphire sphere with control of the pressing force and the deepening of the tip into the sample, which is provided, for example, by the scanning NanoScan-4D hardness tester [12].

The purpose of this work is a comparative study of the wear resistance of a sample of an aluminum alloy modified with ultrafine particles of minerals using the sclerometry method, which makes it possible to measure the physicomechanical properties of the material at the microscale, as well as the determination of some tribological parameters (hardness and elastic modulus) of a duralumin sample with a mineral coating. The parameters of the surface with a mineral coating can be further used to build models of the processes of friction and wear of a surface modified with ultrafine particles of minerals.

Materials and methods

Two samples of aluminum alloy bars EN AW-2024, aluminum alloy of the Al-Cu-Mg system (Al – 93 %, Cu – 4.2 %, Mg – 1.4 %, Mn – 0.4 %), were made by turning without grinding in the form of discs 10 mm thick, with a diameter of 33 mm, with a hole in the middle with a diameter of 11 mm. A modified mineral layer was created on the surface of one of the samples according to the basic technology of SPA «Geoenergetika» [9]. The thickness of the modified layer, on the basis

of the technological parameters during its creation and earlier experiments, was about 10 μm [9]. Comparative measurements of the wear resistance and surface roughness, as well as the hardness and elastic modulus (Young) of the modified samples were performed on the samples.

The surface roughness measurement was carried out on a standard profilometer. The following parameters of the measurement procedure were used: profile length – 12.5 mm, profile measurement speed – 0.5 mm/s.

The measurement of hardness and modulus of elasticity was carried out using a NanoScan-4D nanohardness meter, which allows indentation in accordance with the recommendations of ISO 14577 [12]. The measurement method is the indentation of the diamond pyramid with the registration of the indentation diagram and the subsequent calculation of the hardness and modulus of elasticity in accordance with ISO 14577, which is often called the instrumental indentation method.

The measurements were carried out by the indenter in the form of a three-sided pyramid of the Berkovich type, the loading time was 10 s, the unloading time was 10 s, the time for maintaining the maximum load was 2 s, and the maximum load was 20–1500 mN.

The wear resistance was measured using the NanoScan-4D scanning hardness tester using the method of multi-cycle friction with a sapphire sphere with control of the pressing force and deepening of the tip into the sample [12, 13]. The NanoScan nanohardness tester combines the capabilities of classic nanoindenters and scanning probe microscopes, which have a number of additional features. In this device, the use of sclerometry during abrasion allows using a high-speed feedback system to actively maintain a given load at each point of the trajectory during abrasion. If the tip moves from a local peak to a depression, the load system presses or pulls the measuring head so that the contact conditions are maintained constant. In addition, the possibility of local shock loads characteristic of the passive task of a normal load is excluded. The use of such a measurement system is especially important when testing thin layers, when the layer thickness is comparable with the surface roughness parameters.

The hard-tip is a spheroconic sapphire crystal with a tip radius of 42 μm (Figure 1).

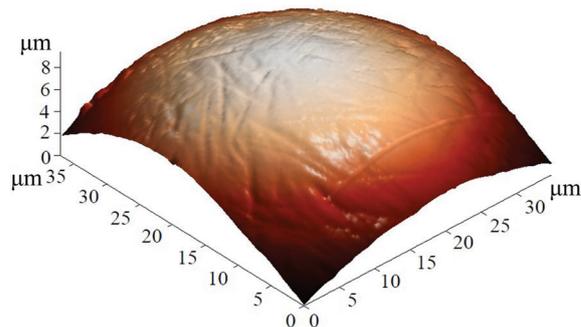


Figure 1 – Image of tip edge, received by means of the Scanning Probe Microscope

The measurement procedure parameters: the radius of the sapphire tip tip is 42 μm , the wear track length is 1 mm, the number of cycles of reciprocating movement is 100, the loading force during testing is 100 mN and 500 mN, the speed of movement of the tip is 120 $\mu\text{m}/\text{s}$. One cycle consisted of two scratches, successively created by direct and reverse stroke. The speed of movement of the tip in the above parameters of the measurement procedure is indicated in the middle of the abrasion area, at the edges of the test area (approximately 5 % of the length) there are areas of acceleration and deceleration. Three friction tests were performed on each sample.

Research results and discussion

The roughness measurement was carried out by measuring the surface profiles of the samples. At least three profiles with a length of 12.5 mm were drawn on each sample; roughness parameters are shown in Table 1.

Table 1

Roughness of the samples⁺

Sample	R_a , μm	R_q , μm	R_z , μm
Aluminium alloy	1.144 ± 0.039	1.393 ± 0.036	6.38 ± 0.15
Aluminum alloy with a modified layer	1.26 ± 0.16	1.69 ± 0.285	11.2 ± 2

⁺ In Table 1: R_a , μm – arithmetic mean deviation; R_q , μm – standard deviation; R_z , μm – height of irregularities at 10 points

It is obvious that the modification of the surface with minerals led to a relatively small increase in the roughness parameters of the samples. The maximum relief difference is close to the intended coating thickness (10 μm). According to ISO 14577,

the hardness measurement should be carried out at a depth of 20 times the parameter Ra , in which case the influence of roughness on the measured value will be less than other sources of error. If this ratio is not observed, a significant increase in the scatter of the measured hardness values is expected due to the deviation of the actual contact area of the tip with the sample from that provided for in the theoretical model.

Measurements in the instrumental nanoindentation mode were carried out with a Berkovich

pyramid-shaped tip and were performed as follows: on each of the samples obtained, a series of injections with various maximum loads were applied. The load was chosen so that the depth of penetration of the tip into the material was from 500 nm to 3 μm . The measurements were carried out without preliminary selection of the indentation site, the distance between the points is not less than 100 μm .

The results of measuring the hardness H and the modulus of elasticity E of the modified sample are shown in Table 2.

Table 2

Mechanical characteristics of the samples

Sample	Load, mN	Depth, nm	Hardness H , GPa	Module elasticity E , GPa
Aluminum alloy with a modified layer	20	740 \pm 240	2.4 \pm 1.8	83 \pm 46
	50	1170 \pm 330	2.1 \pm 0.8	75 \pm 32
	100	1600 \pm 700	2.5 \pm 1.2	84 \pm 37
	250	2600 \pm 700	2.0 \pm 0.8	93 \pm 35
	500	3900 \pm 1000	1.7 \pm 0.7	87 \pm 30

As mentioned above, the thickness of the modified layer was about 10 μm [9], and these measurements were made in the depth range from 1 to 4 μm . At small depths, the influence of the substrate on the measured values is small and, therefore, it could be neglected when determining the average values. The scatter of data is 40–60 % of the measured values, which is expected and due to the relatively large roughness of the samples compared to the indentation depth.

In these measurements using instrumental indentation, it is necessary to focus on the average measured values, since the roughness greatly increases the spread of the measured values. The increase in the spread is due to the fact that the actual contact area can vary at the point of contact of the indenter with the surface, depending on the local topology of the relief.

The specificity of the instrumental indentation technique is that observation of the footprint area is not performed. The hardness values are calculated using the loading diagram recorded during the experiment, which is the dependence of the load applied to the indenter on the depth of indentation of the indenter into the surface of the material. In the model on the basis of which the treatment is carried out in accordance with ISO 14577, the surface is assumed to be normal to the direction of indentation and is absolutely smooth. For such

a surface, the calibration function of the indenter shape is preserved and the calculation of hardness is characterized by maximum accuracy. However, without exception, all real surfaces are rough and wavy, what introduces an error in the calculated values of hardness. At the same time, depending on the contact scheme, the actual contact area can be either larger or smaller than the calibration one. Thus, only because of the surface roughness, the measured value may differ from the true one up or down, since the hardness in this method is calculated as the ratio of the applied load to the contact area of the indenter with the sample. In the present experiment, since the pricking was done at random points on the surface, it is advisable to operate and compare the average measured values for the initial and modified surface, rather than the extreme points, taking into account the error.

Figures 2–5 show photographs of the areas of surface wear after the test and curves for the tip deepening into the sample as a function of test time. Depth values are counted from the surface level during the first abrasion cycle. The tests are marked with numbers in the photographs and the color of the curve in the graphs (1 – black, 2 – red, 3 – blue).

Table 3 shows the average linear wear of the specimen between 50 and 100 test cycles, Δh – linear wear, average tip groove per friction test cycle.

Table 3

Linear wear

Sample	Load, mN	Linear wear Δh , nm
Aluminium alloy	100	75 ± 15
Aluminum alloy with a modified layer	100	5.9 ± 1.2

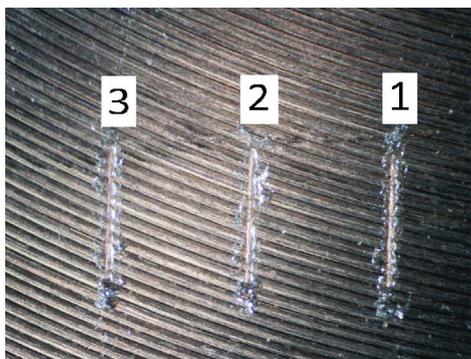


Figure 2 – A photograph (x40) of the surface of aluminium alloy sample without modification after testing with a load of 100 mN

From the data of Table 3 and Figures 3 and 5 it can be seen that the wear resistance of the surface of a sample of aluminum alloy, modified by minerals according to the technology of mineral coatings, increased by more than 12 times compared to the wear resistance of the surface of the aluminum alloy without modification. The observed wear schedules are very similar to the traditional curve of normal wear at the run-in and normal wear stages [14–15]. Small fluctuations can be explained by the role of

microparticles of minerals, deflecting the needle of a scanning probe microscope. Thus, the present study suggests that at the micro level, wear should follow the general patterns characteristic of macrosystems, adjusted for the increasing role of surface forces and adhesion [11, 14].

The lack of standardized test methods is explained by the complexity of the processes and the presence of a large number of factors that affect friction and wear of materials, the divergence of views and theoretical positions from which they are considered. The processes that occur during friction and wear can be very different from materials, environmental conditions, the presence and properties of the lubricant. The frictional properties of materials are affected by the physicochemical state of the surface, temperature, specific load, sliding speed, elastic modulus, hardness, brittleness, roughness, and fatigue coefficient [14–15]. Depending on the relative penetration depth, the microroughness of the friction surfaces and the relationship between the cohesion and adhesion forces on the actual contact spots, the following can be realized: elastic deformation, plastic displacement of the material, microcutting, setting of films or surfaces (adhesive or cohesive detachment) [15]. All this causes the emergence of many test methods, many of which later become standardized [16]. Numerous factors affecting friction and wear necessitate the study of their combined effect and mutual influence to obtain the most complete information about the material and require, as a rule, the use of several measurement methods.

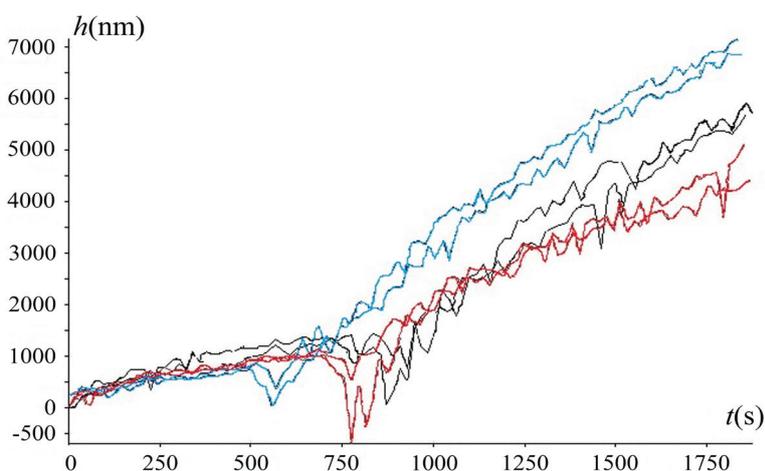


Figure 3 – Wearing diagram of the surface of a aluminium alloy sample without modification when using a sapphire tip with a load of 100 mN. In the diagram: h (μm) – value of the tip deepening, t (s) – test duration. The depth value is measured from the surface level during the first abrasion cycle. The tests are indicated by numbers on the photographs and the colour of the curve on the graphs (1 – black, 2 – red, 3 – blue)

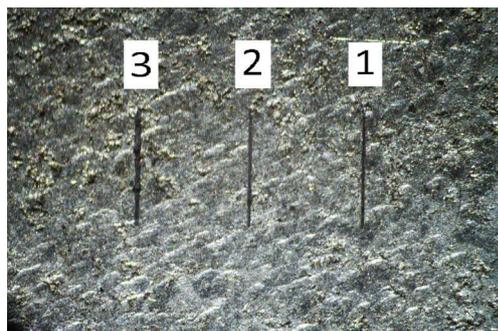


Figure 4 – A photograph (x40) of the surface of a aluminium alloy sample with modification of the surface by minerals after testing with a load of 100 mN

In the future construction of a model of the process of friction of metal layers modified with ultrafine particles of minerals, the interconnectedness

of physical processes occurring at different scales should be taken into account. For example, in the process of friction of two surfaces, changes occur in the macro-volumes of matter, the micro-volumes of matter, and in the electronic shells of their atoms. The miniaturization of the models of rubbing bodies leads to a transition from the bulk properties of the material, on which averaging over the main inhomogeneities and the description by methods of the elastic-plastic medium are possible, to their surface properties, estimated by measuring adhesion, micro and nanoindentation. The lack of an acceptable explanation of the nature of the special properties of the surface modified by ultrafine particles of minerals of natural origin does not preclude the use of the observed effects to significantly increase the resource of various parts and mechanisms.

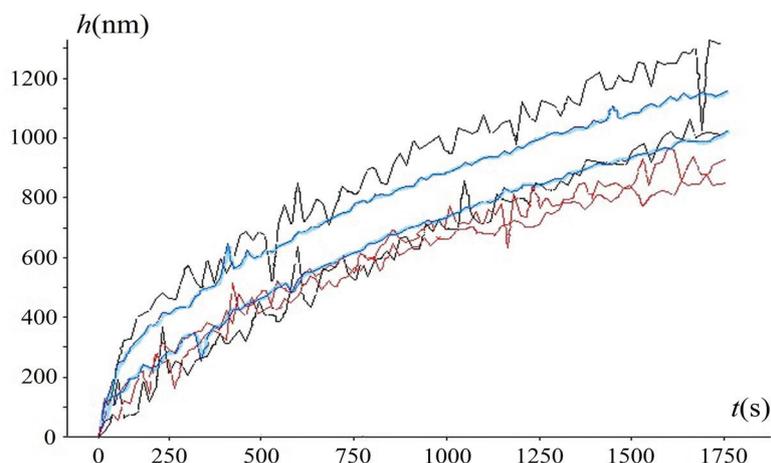


Figure 5 – Wearing diagram of the surface of a aluminium alloy sample with modification of the surface by minerals when using a sapphire tip with a load of 100 mN. In the diagram: h (μm) – value of the tip deepening, t (s) – test duration. The depth value is measured from the surface level during the first abrasion cycle. The tests are indicated by numbers on the photographs and the colour of the curve on the graphs (1 – black, 2 – red, 3 – blue)

The relevance of measurement accuracy in the micro and nanometer range is confirmed by the international standard published in 2012 on methods for conducting micro and nanotribological tests [16]. It focuses on the general requirements for the testing machine and basic test methods. Further development of the standard may concern the features of the choice of measuring methods and types of tips, depending on the tasks assigned to the researcher.

Conclusions

A comparative study of the wear resistance of a sample of an aluminum alloy EN AW-2024 (aluminum alloy of the Al-Cu-Mg system) modified by

ultradispersed mineral particles was performed using the sclerometry method. This method measures the physicomechanical properties of the material in microscale, and also determined the hardness and elastic modulus specimen of aluminum alloy with mineral coating. After the modification of the surface of the sample of aluminum alloy by the technology of mineral coatings using low-temperature technological operations (local heating to 80 °C), the wear resistance of the surface of the sample of aluminum alloy modified by mineral particles increased by more than 12 times compared to the wear resistance of the surface of aluminum alloy without modification. The obtained parameters of the modified surface of the aluminum alloy can

be further used to build models of the processes of friction and wear of the surface, modified by ultradispersed particles of minerals.

References

1. Frank W.B., Haupin W.E., Vogt H., Bruno M., Thonstad J., Dawless R.K., Kvande H., Taiwo O.A. Aluminium in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 2009, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. **DOI:** 10.1002/14356007.a01_459.pub2
2. Light Metals 2016, The Minerals, Metals & Materials Society, 2016, 1053 p. **DOI:** 10.1002/9781119274780
3. Wan Y., Wang H., Zhang Y., Wang X., Li Y. Study on Anodic Oxidation and Sealing of Aluminum Alloy. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2018, vol. 13, pp. 2175–2185. **DOI:** 10.20964/2018.02.78
4. Kumar K., Davim J.P. Composites and Advanced Materials for Industrial Applications. *Hershey*, USA: IGI Global, 2018, 423 p.
5. Kala H., Mer K.K.S., Kumar S. A Review on Mechanical and Tribological Behaviors of Stir Cast Aluminum Matrix Composites. *Procedia Materials Science*, 2014, vol. 6, pp. 1951–1960. **DOI:** 10.1016/j.mspro.2014.07.229
6. Adebisi A.A., Maleque M.A., Rahman Md.M. Metal matrix composite brake rotor: historical development and product life cycle analysis. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 2011, vol. 4, pp. 471–480. **DOI:** 10.15282/ijame.4.2011.8.0038
7. Khodabakhshi F., Simchi A., Kokabi A.H. Surface modifications of an aluminum-magnesium alloy through reactive stir friction processing with titanium oxide nanoparticles for enhanced sliding wear resistance. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 309, pp. 114–123. **DOI:** 10.1016/j.surfcoat.2016.11.060
8. Montealegre M.A., Castro G., Rey P., Arias J.L., Vázquez P., Gonzál M. Surface Treatments by Laser Technology. *Contemporary Materials*, 2010, I–1, pp. 19–30. **DOI:** 10.5767/anurs.cmat.100101.en.019M
9. Kislov S.V., Kislov V.G., Skazochkin A.V., Bondarenko G.G., Tikhonov A.N. Effective mineral coatings for hardening the surface of metallic materials. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2015, no. 7, pp. 558–564. **DOI:** 10.1134/S0036029515070095
10. Skazochkin A.V., Useinov A.S., Kislov S.V. Surface hardening of titanium alloy by minerals. *Letters on Materials*, 2018, no. 8(1), pp. 81–87. **DOI:** 10.22226/2410-3535-2018-1-81-87
11. Skazochkin A., Bondarenko G., Kislov S. Research of Tribological Features of Steel Surface by Creating Mineral Coatings. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2018, vol. 11, iss. 6, pp. 138–143. **DOI:** 10.25103/jestr.116.17
12. Maslenikova I., Reshetov V.N., Useinov A.S. Mapping the Elastic Modulus of a Surface with a NanoScan 3D Scanning Microscope. *Instruments and Experimental Techniques*, 2015, vol. 58, no. 5, pp. 711–717. **DOI:** 10.1134/S0020441215040223
13. Useinov A., Gogolinskiy K., Reshetov V. Mutual consistency of hardness testing at micro- and nanometer scales. *Int. J. Mater. Res.*, 2009, vol. 100, pp. 968–972. **DOI:** 10.3139/146.110138
14. Bhushan B. Modern Tribology Handbook, Two Volume Set. USA, *CRC Press Inc.*, 2000, 1760 p.
15. Panjkovic V. Friction and the Hot Rolling of Steel. New York, *CRC Press Inc.*, 2014, p. 223.
16. ISO/TR 11811:2012 Nanotechnologies – Guidance on methods for nanoand microtribology measurements.

УДК 621.317.08

Цифровизация измерений спектров в базисе Фурье – тенденции развития и проблемы

О.В. Пономарева, А.В. Пономарев, Н.В. Смирнова

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия

Поступила 12.02.2018

Принята к печати 23.08.2019

На современном этапе развития цифровых информационных технологий происходит интенсивная цифровизация (компьютеризация) как прямых, так и косвенных методов измерения. Прямым следствием компьютеризации измерений стало, во-первых, появление нового класса средств измерения – процессорных измерительных средств (ПриИС); во-вторых, повышение уровня формализации измерительных процедур; в-третьих, создание новой, революционной технологии – технологии виртуальных приборов (ВП). Цель статьи – анализ развития цифровых технологий измерений спектров, выявление возникающих при этом проблем и формулирование первоочередных научных и прикладных задач по их разрешению.

Теоретическими и прикладными исследованиями установлено, что цифровые технологии измерений спектра, кроме существенных преимуществ, обладают и определенными недостатками. Показано, что недостатки цифровых технологий измерений спектров вытекают как из природы цифровых методов, так и из аналитических и стохастических свойств базисов применяемых преобразований при измерениях спектров. Анализ цифровых методов измерений спектров показал, что методы, основанные на дискретном преобразовании Фурье (ДПФ), сохраняют свою ведущую роль и эффективны практически во всех предметных областях. Однако есть и проблемы цифровизации измерений спектров сигналов на основе ДПФ, которые связаны, прежде всего, с проявлением ряда негативных эффектов, которые отсутствуют при аналоговых методах измерения спектров на основе преобразования Фурье. Это эффект периодизации измерительного сигнала и его спектра, эффект частотола, а также эффект наложения. Как показал анализ, существующие методы борьбы с негативными эффектами цифровизации измерений спектров разрешают проблемы внедрения цифровых технологий лишь отчасти. Для борьбы с негативными эффектами цифровизации измерений спектров в работе предложено обобщение ДПФ в виде параметрического ДПФ (ДПФ-П).

Сформулированы основные научные и прикладные задачи компьютеризации измерений спектров сигналов: развитие теории цифровых методов измерения спектров сигналов, создание новых и усовершенствование существующих цифровых методов измерений спектров сигналов, разработка алгоритмического, программного и метрологического обеспечений ПриИС и ВП для реализации ДПФ-П.

Ключевые слова: косвенные методы измерений, цифровизация измерений, модель измерения, процессорное измерительное средство спектр сигнала.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-271-280

Адрес для переписки:

О.В. Пономарева
Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: ponva@mail.ru

Address for correspondence:

O.V. Ponomareva
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: ponva@mail.ru

Для цитирования:

О.В. Пономарева, А.В. Пономарев, Н.В. Смирнова
Цифровизация измерений спектров в базисе Фурье – тенденции
развития и проблемы.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 3. – С. 271–280.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-271-280

For citation:

O.V. Ponomareva, A.V. Ponomarev, N.V. Smirnova
[Digitalization of Spectral Measurements in the Fourier Basis –
Development Trends and Problems].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 3, pp. 271–280 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-271-280

Digitalization of Spectral Measurements in the Fourier Basis – Development Trends and Problems

O.V. Ponomareva, A.V. Ponomarev, N.V. Smirnova

Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia

Received 12.02.2018

Accepted for publication 23.08.2019

Abstract

At the present stage of development of digital information technologies intensive digitalization (computerization) of both direct and indirect measurement methods is taking place. The direct consequence of the computerization of measurements was, firstly, the emergence of a new class of measuring instruments – Processor measuring instruments (PRIS), secondly, increasing the level of formalization of measuring procedures, thirdly, the creation of a new, revolutionary technology – Virtual Instrument (VI). The purpose of the article is to analyze the development of digital technologies for measuring spectra, identifying the problems that arise in this case and formulating priority scientific and applied problems for their resolution.

Theoretical and applied research has established that digital spectrum measurement technologies, in addition to significant advantages, have certain disadvantages. It has been shown that the disadvantages of digital technologies for measuring spectra arise both from the nature of digital methods and from the analytical and stochastic properties of the bases of the applied transformations in measuring the spectra. An analysis of digital methods for measuring spectra showed that methods based on Discrete Fourier Transform (DFT) retain their leading role and are effective in almost all subject areas. However, there are also problems of digitalization of measurements of the spectra of signals based on the DFT, which are associated, first of all, with the manifestation of a number of negative effects that are absent with analog methods for measuring spectra based on the Fourier transform. This is the periodization effect of the measuring signal and its spectrum, the stockade effect, as well as the aliasing effect. As the analysis showed, existing methods of dealing with the negative effects of digitalization of spectrum measurements solve the problems of introducing digital technologies only partially. To combat the negative effects of digitalization of spectral measurements, a generalization of the DFT in the form of a parametric DFT (DFT-P) (Parametric Discrete Fourier Transform – DFT-P) is proposed.

The main scientific and applied problems of computerization of signal spectrum measurements are formulated: the development of the theory of digital methods for measuring signal spectra, the creation of new and improvement of existing digital methods for measuring signal spectra, the development of algorithmic, software and metrological software for PRIS and VI for the implementation of DFT-P.

Keywords: indirect measurement, digitalization of measurements, measurement model, processor measuring tool, signal spectrum.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-271-280

Адрес для переписки:

О.В. Пономарева
Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: ponva@mail.ru

Address for correspondence:

O.V. Ponomareva
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: ponva@mail.ru

Для цитирования:

О.В. Пономарева, А.В. Пономарев, Н.В. Смирнова
Цифровизация измерений спектров в базисе Фурье – тенденции
развития и проблемы.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 3. – С. 271–280.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-271-280

For citation:

O.V. Ponomareva, A.V. Ponomarev, N.V. Smirnova
[Digitalization of Spectral Measurements in the Fourier Basis –
Development Trends and Problems].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 3, pp. 271–280 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-271-280

Введение

Начиная с 1970-х годов процесс развития измерительной техники проходит при возрастающем влиянии цифровых информационных технологий (*Digital Information Technologies – DIT-технологии*) [1–15]. В результате их внедрения был запущен механизм цифровизации (компьютеризации) измерений, при котором компьютеры стали использоваться не только для обработки результатов измерений, но и были непосредственно включены в состав измерительных процедур. Прямым следствием компьютеризации измерений стало, во-первых, появление нового класса средств измерения – процессорных измерительных средств (ПриИС); во-вторых, повышение уровня формализации измерительных процедур; в-третьих, создание новой, революционной технологии – технологии виртуальных приборов¹ (ВП), получившей широкое распространение при создании приборов измерения и измерительных систем, включая их моделирование и тестирование. Внедрение *DIT-технологий* в практику решения измерительных задач потребовало дальнейшего совершенствования модели измерения (уравнения измерений), создания новых подходов к формализованному описанию измерительных процедур (методов и алгоритмов).

Наиболее общая форма уравнения измерений предложена в монографиях [14, 15] в виде обобщенного оператора:

$$\lambda^* = L[\gamma(t)] = R_2 K R_1[\gamma(t)], \quad (1)$$

где λ^* – результат измерения физической величины λ ; $\gamma(t)$ – измерительный сигнал (сигнал, содержащий количественную информацию об измеряемой физической величине); L – обобщенный оператор, представляющий алгоритм измерения – последовательность измерительных преобразований, выполняемых при измерении; R_1 – оператор преобразований, осуществляемых в аналоговом виде; K – сравнение величины $R_1[\gamma(t)]$ с принятой образцовой единицей измерения (осуществляется с помощью аналого-цифрового преобразователя); R_2 – оператор преобразований, осуществляемых в цифровом виде.

Преимущества такого подхода к модели измерения заключаются в том, что путем разби-

ения обобщенного оператора, исходя из соответствующей априорной информации, на некоторую последовательность операторов, мы получаем возможность детализировать уравнение измерений [9, 10].

Отметим, что цифровизация измерительных средств сопровождалась повышением уровня формализации соответствующих моделей измерений, что продемонстрировано на рисунке 1, на котором приведены этапы эволюции средств измерительной техники и развитие соответствующих им форм модели измерений [15].

Проблемы цифровизации измерений спектров в базисе Фурье

Проведя, согласно уравнению измерения (1), преобразование исходного аналогового измерительного сигнала в цифровую форму с помощью аналого-цифрового преобразователя, мы получаем возможность применять *DIT-технологии* для измерения параметров цифровых измерительных сигналов на конечных интервалах (ЦИСнКИ), как во временной, так и в частотной областях. Отметим, что измерение некоторых параметров предпочтительней проводить во временной области, например, длительностей фронта и спада импульсов, огибающей, выбросов, биений и др. Измерение других параметров предпочтительней проводить в частотной области, например, амплитуд, частот, фаз составляющих исходного измерительного сигнала, искажений.

Измерения в частотной области приобрели особую роль благодаря широкому распространению частотных моделей измерительного сигнала в таких предметных областях, как виброакустическое функциональное диагностирование механических объектов, экологическая безопасность, медицинская диагностика, пассивная и активная гидролокация, распознавание речи и изображений, обработка музыкально-акустических сигналов, сейсмология, геофизика и др. [6–17]. Определение параметров частотных моделей позволяет получить методами и средствами измерений точные и достоверные знания о состоянии исследуемых объектов, явлениях и процессах, происходящих в них.

¹Термин «виртуальный прибор» нельзя признать удачным. Средства измерений, разработанные по данной цифровой информационной технологии, не являются виртуальными в истинном понимании этого слова, поскольку осуществляют реальные измерения. Появление термина «виртуальный» в названии измерительного средства объясняется компьютерной (виртуальной) имитацией соответствующих функций разрабатываемого измерительного прибора математическими и программными методами.

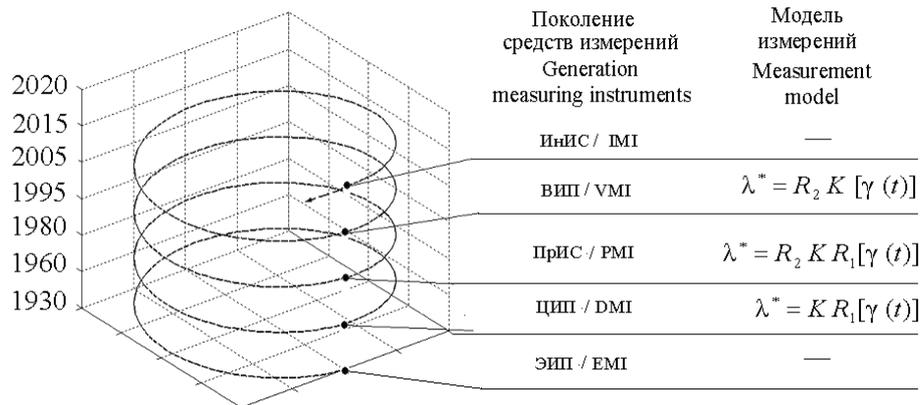


Рисунок 1 – Этапы эволюции измерительных средств: ЭИП – электромеханические и электронные измерительные приборы; ЦИП – цифровые измерительные приборы; ПРИС – процессорные измерительные средства; ВИП – виртуальные измерительные приборы; ИИС – интеллектуальные измерительные средства; λ^* – результат измерения физической величины λ

Figure 1 – Evolution of measuring instruments: EMI – electromechanical and electronic measuring instruments; DMI – digital measuring instruments; PPM – processor measuring means; VMI – virtual measuring instruments; IMM – intellectual measuring means; λ^* – the result of measuring the physical quantity λ

ЦИСнКИ $x(n)$; $n = 0, (N-1)$ на конечном интервале длительностью N отсчетов можно представить в виде суммы ортогональных сигналов с определенными амплитудами (весовыми значениями), частотами и фазами. Совокупность квадратов этих амплитуд принято называть энергетическим спектром, а совокупность амплитуд и фаз – векторным спектром в выбранной базисной системе. На практике наибольшее применение получила базисная система дискретных экспоненциальных функций (ДЭФ):

$$\text{def}_N(p, l) = \exp(-j \frac{2\pi}{N} pl) = W_N^{pl} = \cos(\frac{2\pi}{N} pl) - j \sin(\frac{2\pi}{N} pl), \quad p, l = \overline{0, N-1}. \quad (2)$$

Система дискретных экспоненциальных функций, заданная на интервале N , является полной системой, так как число независимых базисных функций в системе равно N и число отсчетов каждой базисной функции также равно N . Данная базисная система позволяет измерять частотный спектр методом дискретного преобразования Фурье (ДПФ) ЦИСнКИ на k нормированных частотах² $f_k = k / N$ одновременно. ДПФ может быть представлено в двух формах алгебраической и матричной.

²Переход от нормированной частоты $f_k = k / N$ к «истинной» частоте $f_{\text{ист}}$ осуществляется согласно выражению: $f_{\text{ист}} = f_k \cdot F_D$, где F_D – частота дискретизации измерительного сигнала $x(n)$.

Алгебраическая форма ДПФ задается следующим соотношением:

$$S_N(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn}; \quad k = \overline{0, (N-1)}, \quad (3)$$

где $S_N(k)$ – коэффициенты (бины³) ДПФ на нормированной частоте f_k .

Матричная форма ДПФ задается следующим матричным уравнением:

$$S_N = \frac{1}{N} F_N X_N, \quad (4)$$

где $X_N = [x(0), x(1), \dots, x(N-1)]^T$ – представление ЦИСнКИ $x(n)$, $n = \overline{0, N-1}$, в виде вектора N -мерного линейного пространства; T – знак транспонирования; $S_N = [s(0), s(1), \dots, s(N-1)]^T$ – вектор коэффициентов разложения X_N по системе ДЭФ, задаваемой матрицей F_N :

$$F_N = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & \dots & (N-1) \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ \dots \\ (N-1) \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & W_N^1 & \dots & W_N^{(N-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & W_N^{(N-1)} & \dots & W_N^{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (5)$$

³Отдельные коэффициенты (отсчеты) ДПФ называют также бинами («Bin») – в переводе с английского «хранилище»), что подчеркивает тот факт, что энергия сигнала под кривой $\frac{\sin(N \cdot x / 2)}{N \sin(x / 2)}$ (передаточная характеристика фильтра ДПФ) попадает в «хранилище» данного коэффициента ДПФ.

Измерение спектра на k -й нормированной частоте f_k является, согласно рекомендациям по межгосударственной стандартизации – РМГ 29-2013, линейным косвенным измерением. Как известно, в данном виде измерений искомое значение физической величины Q находят на основании известной линейной функциональной зависимости:

$$Q = \sum_{i=1}^m b_i \cdot Q_i, \quad (6)$$

где b_i – постоянный коэффициент i -го аргумента Q_i ($Q_i, i=1, m$ – значения физических величин, полученные при прямых измерениях); m – число аргументов.

Сравнивая (6) и (3) нетрудно видеть, что каждое k -е, $k = 0, (N-1)$ значение коэффициента (бина) ДПФ (каждое значение частотного спектра на определенной нормированной частоте k/N) представляет собой линейное косвенное измерение величины, в котором в качестве функциональной зависимости используется k -я дискретная базисная функция ДПФ определенной частоты – k -я ДЭФ. Отметим, что широкое применение ДПФ при измерениях спектра цифровых измерительных сигналов связано, во-первых, со значительными преимуществами *DIT*-технологий; во-вторых, с широким распространением полигармонических ЦИСнКИ: периодической, ангармонической и почти периодической структур в системах естественного и искусственного происхождения; в-третьих, с адекватностью аппарата ДПФ этим видам ЦИСнКИ.

Не трудно убедиться, что измерение всех величин, $S_N(k)$, согласно соотношению (7), даже при умеренных значениях N требует огромных вычислительных затрат. Это обстоятельство являлось серьезной проблемой для внедрения *DIT*-технологий вплоть до 1965 года. Появление метода быстрого вычисления ДПФ (Cooley J.W., Tukey J.W. 1965 г.), сократившего время вычислений ДПФ на несколько порядков и получившего название алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ) резко изменило положение дел. Появление алгоритмов БПФ [1] дало мощный толчок развитию *DIT*-технологий, широкому их внедрению во многие области науки и техники [2–21].

Практика внедрения *DIT*-технологий, основанных в той или иной мере на ДПФ, выявила и недостатки данного преобразования, которые

существенно снижали результативность и эффективность решения измерительных задач.

DIT-технологии на основе методов прямого ДПФ и обратного ДПФ вносят свои погрешности измерений значений спектра. Кроме погрешностей, присущих аналоговым методам измерения значений спектра, связанных с проявлением эффекта утечки и гребешкового эффекта, при применении *DIT*-технологии дополнительно проявляются эффекты периодизации, частотокола и наложения.

В то же время системный анализ приложений цифровых методов измерений величин, основанных на прямом ДПФ и обратном ДПФ, показал, что, во-первых, эти методы сохраняют свою ведущую роль в измерениях спектров ЦИСнКИ; во-вторых, результаты и эффективность методов могли бы быть более значимыми, если бы не принципиальные недостатки прямого ДПФ и обратного ДПФ. Отметим, что существующие методы снижения влияния негативных эффектов (эффектов периодизации, частотокола и наложения, а также эффекта утечки и гребешкового эффекта) на результаты измерений спектров ЦИСнКИ [2–7] разрешают проблемы, возникающие при внедрении *DIT*-технологий, лишь отчасти.

Обобщение дискретного преобразования Фурье

С целью решения проблем внедрения *DIT*-технологий на основе методов прямого ДПФ и обратного ДПФ в работах [18–21] предложено обобщение ДПФ в виде параметрического дискретного преобразования Фурье (ДПФ-П), которое представляет собой разложение дискретного сигнала по базису параметрических дискретных экспоненциальных функций (ДЭФ-П):

$$\text{def}_{N,p}(k, n, \theta) = W_N^{(k+\theta)n} = \exp\left[-j \frac{2\pi}{N}(k+\theta)n\right], \quad (7)$$

$$0 \leq \theta < 1.$$

Очевидно, что при значении параметра $\theta = 0$ ДПФ-П тождественно ДПФ. ДПФ-П, как и ДПФ, может быть представлено в двух формах – алгебраической и матричной.

Алгебраическая форма ДПФ-П задается следующим соотношением:

$$S_N(k, \theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{(k+\theta)n}, \quad (8)$$

$$k = 0, (N-1); \quad 0 \leq \theta < 1,$$

где θ параметр ДПФ-П.

Матричная форма ДПФ-П задается следующим матричным уравнением:

$$S_{N,\theta} = \frac{1}{N} F_{N,\theta} X_N; \quad 0 \leq \theta < 1, \quad (9)$$

где $S_{N,\theta} = [s(0,\theta), s(1,\theta), \dots, s((N-1),\theta)]^T$ – вектор коэффициентов (бинов) ДПФ-П, полученных путем измерения спектра в системе ДЭФ-П, которая задается матрицей $F_{N,\theta}$; T – знак транспонирования.

$$F_{N,\theta} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & \dots & (N-1) \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ \dots \\ (N-1) \\ k \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & W_N^\theta & \dots & W_N^{\theta(N-1)} \\ 1 & W_N^{(1+\theta)} & \dots & W_N^{(1+\theta)(N-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & W_N^{(N-1+\theta)} & \dots & W_N^{(N-1+\theta)(N-1)} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (10)$$

В рамках аппаратов ДПФ и ДПФ-П вводятся понятия энергетических спектров $G_N(k)$ и $G_N(k, \theta)$, а также соответствующих спектров мощности $P_N(k)$ и $P_N(k, \theta)$:

$$G_N(k) = \frac{P_N(k)}{\Delta f} = N |S_N(k)|^2, \quad P_N(k) = |S_N(k)|^2, \quad (11)$$

$$G_N(k, \theta) = \frac{P_N(k, \theta)}{\Delta f} = N |S_N(k, \theta)|^2, \quad P_N(k, \theta) = |S_N(k, \theta)|^2, \quad (12)$$

где $\Delta f = \frac{1}{N}$ – интервал по частоте между отсчетами $S_N(k, \theta)$.

При равенстве интервалов по частоте между отсчетами $S_N(k)$ и между отсчетами $S_N(k, \theta)$, сетки частот ДПФ и ДПФ-П смещены друг относительно друга на $0 \leq \theta < 1$ (напомним, что при $\theta = 0$ ДПФ-П «переходит» в ДПФ).

Рассмотрим решение задачи измерения частоты гармонического сигнала методами ДПФ и ДПФ-П.

Измерение частоты гармонического сигнала методами дискретного преобразования Фурье и параметрического дискретного преобразования Фурье

Пусть задан гармонический сигнал $x(n)$ на конечном интервале $n = \overline{0, (N-1)}$ с единичной амплитудой, частотой $k_1 = m + \Delta m = 14 + 0,51$ и фазой $\alpha = \frac{2\pi}{N} p$, $p = \overline{0, N-1}$, полученный дискретизацией аналогового сигнала $x(t)$ с частотой F_D :

$$x(n) = \cos \left\{ \left[\frac{2\pi}{N} (m + \Delta m)n \right] + \alpha \right\}. \quad (13)$$

Подставляя (13) в (8) получим:

$$S_N(k, \theta) = \frac{1}{2N} \sum_{n=0}^{N-1} \left(\begin{matrix} \sin \left(\frac{2\pi(m + \Delta m - k - \theta)n}{N} + \alpha \right) + \sin \left(\frac{2\pi(m + \Delta m + k + \theta)n}{N} + \alpha \right) + \\ -j \cos \left(\frac{2\pi(m + \Delta m - k - \theta)n}{N} + \alpha \right) + j \cos \left(\frac{2\pi(m + \Delta m + k + \theta)n}{N} + \alpha \right) \end{matrix} \right). \quad (14)$$

Представим спектр $S_N(k, \theta)$ в виде суммы двух членов: $A_N(k, \theta)$ и $B_N(k, \theta)$, значения которых определяются значениями спектра $S_N(k, \theta)$,

расположенными соответственно на положительных частотах – $A_N(k, \theta)$ и на отрицательных частотах⁴ – $B_N(k, \theta)$:

$$A_N(k, \theta) = \frac{1}{2N} \sum_{n=0}^{N-1} \left(\sin \left(\frac{2\pi(m + \Delta m - k - \theta)n}{N} + \alpha \right) - j \cos \left(\frac{2\pi(m + \Delta m - k - \theta)n}{N} + \alpha \right) \right); \quad (15)$$

$$B_N(k, \theta) = \frac{1}{2N} \sum_{n=0}^{N-1} \left(\sin \left(\frac{2\pi(m + \Delta m + k + \theta)n}{N} + \alpha \right) + j \cos \left(\frac{2\pi(m + \Delta m + k + \theta)n}{N} + \alpha \right) \right). \quad (16)$$

⁴При применении ДПФ и ДПФ-П значения переменной k общепринято отождествлять с частотой: при $k = 0, (N/2)$ – положительные частоты, при $k = (N/2 + 1), (N-1)$ – отрицательные частоты.

Нетрудно видеть, что из выражения (16) непосредственно следует, что эффект утечки спектра для ДПФ-П отсутствует не только при $\Delta m = \theta = 0$ (рисунок 2а), но и при $\Delta m = \theta = 1/2$ (рисунок 3а). В то время, как

для ДПФ это самый «тяжелый» случай (рисунок 2б). При значении параметра $\Delta m = \theta \neq 1/2$ эффект утечки на положительных частотах (15) отсутствует, а на отрицательных частотах присутствует (рисунок 3б).

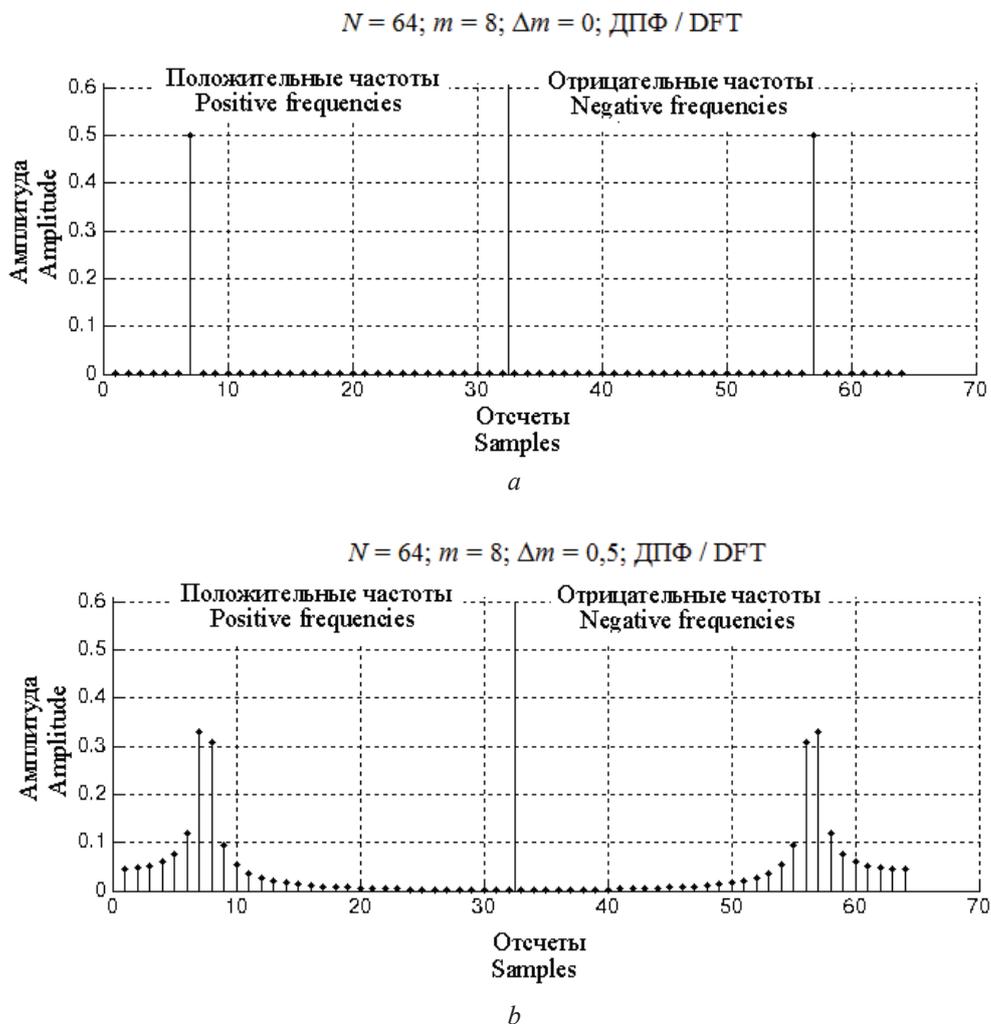


Рисунок 2 – Эффект утечки спектра при применении дискретного преобразования Фурье для значений параметра $\theta = 0$ (а); $\theta = 0,5$ (б)

Figure 2 – The effect of spectrum leakage when using the discrete fourier transform for parameter values $\theta = 0$ (а); $\theta = 0,5$ (б)

В силу того, что при значении параметра ДПФ-П $\theta = \Delta m$ эффект утечки на положительных частотах отсутствует, то измерение частоты гармонического сигнала (13) можно провести с заданной точностью, решая задачу:

$$\max_{k, \theta} [\text{abs} [S_N(k, \theta)]; \overline{\quad\quad\quad}; k = 0, N/2 - 1; 0 \leq \theta < 1. \quad (17)$$

Для реализации преимуществ ДПФ-П перед ДПФ нужны быстрые процедуры его осуществления (аналогичные БПФ), поскольку измери-

тельное преобразование ДПФ-П требует выполнения N^2 комплексных умножений и сложений.

В работе [19] доказано существование для ДПФ-П быстрых алгоритмов – параметрических БПФ (БПФ-П). Поскольку базис ДЭФ-П (7) является мультипликативным лишь по одной переменной n , то существует только один класс алгоритмов БПФ-П – класс алгоритмов БПФ-П с прореживанием по времени. На рисунке 4 в качестве примера приведен граф алгоритма БПФ-П без замещения.

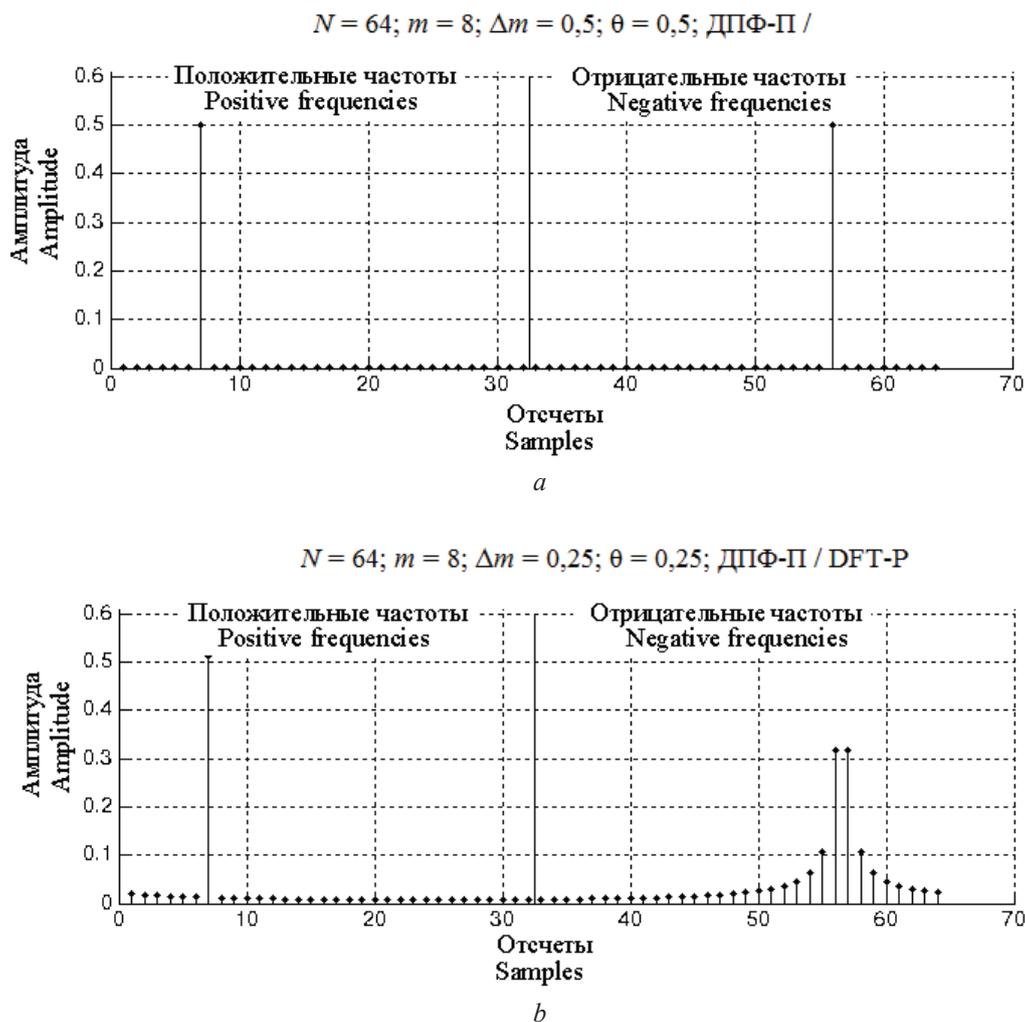


Рисунок 3 – Эффект утечки спектра при применении параметрического дискретного преобразования Фурье для значений параметра $\theta = 0,5$ (a); $\theta = 0,25$ (b)

Figure 3 – The effect of spectrum leakage when using the parametric discrete Fourier transform for parameter values $\theta = 0,5$ (a); $\theta = 0,25$ (b)

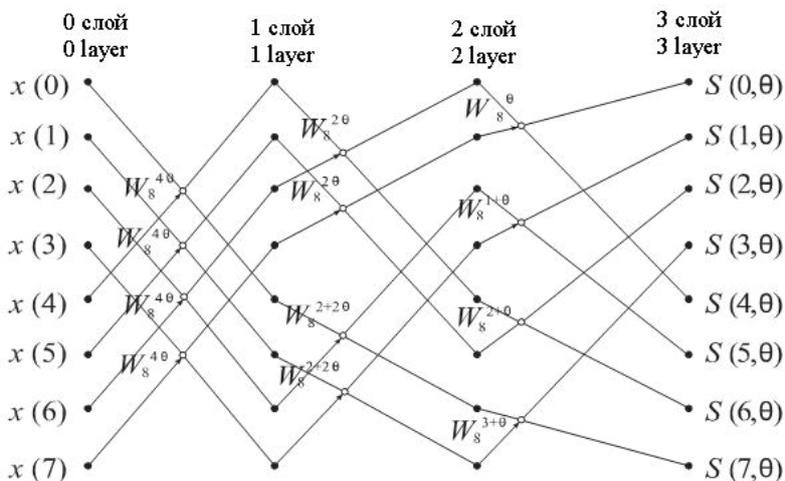


Рисунок 4 – Граф алгоритма параметрического быстрого преобразования Фурье без замещения

Figure 4 – Parametric discrete Fourier algorithm graph without substitution

Алгоритм имеет естественный порядок отсчетов на входе и выходе, что, безусловно, является преимуществом данного алгоритма.

Заключение

С целью решения проблем внедрения цифровых информационных технологий, основанных в той или иной мере на дискретном преобразовании Фурье, предложено его обобщение в виде параметрического дискретного преобразования Фурье, которое за счет введения нового базиса Фурье – базиса Фурье с варьируемым параметром, позволяет устранить или значительно снизить влияние негативных эффектов, сопровождающих применение измерительных технологий на базе преобразований Фурье.

Проведена, путем численного моделирования, экспериментальная проверка полученных теоретических результатов по измерению частоты дискретного гармонического сигнала на конечном интервале методом параметрического дискретного преобразования Фурье. Проверка доказала результативность разработанного метода цифрового измерения спектра гармонических сигналов на конечных интервалах. Действительно, в случае применения для измерения частоты дискретного гармонического сигнала дискретного преобразования Фурье погрешность фиксирована и равна половине расстояния между двумя бинами, в то время как применение параметрического дискретного преобразования Фурье позволяет провести измерение частоты с необходимой точностью путем варьирования параметра введенного преобразования. Например, при численном моделировании, рассмотренном в работе, точность измерения частоты была повышена в 50 раз.

Эффективность приложений параметрического дискретного преобразования Фурье предполагает, прежде всего, наличие быстрых алгоритмов его получения, существование которых позволяет снизить вычислительные затраты на порядок и более. Базис параметрического дискретного преобразования Фурье является мультипликативным лишь по одной переменной (в отличие от базиса дискретного преобразования Фурье, который мультипликативен по двум переменным). Поэтому существует только один класс быстрых алгоритмов параметрического дискретного преобразования Фурье – класс алгоритмов с прореживанием по времени.

Список использованных источников

1. Cooley, J. An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series / J. Cooley, J. Tukey // Math. Comput. – 1965. – Vol. 19, no. 90. – P. 297–301. DOI: 10.2307/2003354
2. Oppenheim, A.V. Discrete-Time Signal Processing / A.V. Oppenheim, R.W. Schaffer // Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 2009. – 1120 p.
3. Sumathi, S. LabVIEW based Advanced Instrumentation Systems / S. Sumathi, P. Surekha // Springer, 2007. – 728 p.
4. Bress, T. Effective Labview Programming / T. Bress // New York: NTC Press, 2013. – 720 p.
5. Folea, S. LabVIEW – Practical Applications and Solutions / S. Folea // InTech, 2011. – 472 p.
6. Richard, G. Lyons. Understanding Digital Signal Processing (3rd Edition) 3rd Edition / G. Richard // Prentice-Hall, 2010. – 210 p.
7. Финкелстайн, Л. Наука об измерениях: анализ состояния и направлений развития / Л.Финкелстайн // Датчики и системы. – 2010. – № 2. – С. 53–57.
8. Yaroslavsky, L.P. Compression, restoration, resampling, ‘compressive sensing’ fast transforms in digital imaging / L.P. Yaroslavsky // Journal of Optics. – 2015. – Vol. 17, no. 7. – P. 073001.
9. Favorskaya, M.N. Development of mathematical theory in computer vision / M.N. Favorskaya, L.C. Jain // Intelligent Systems Reference Library. – 2015. – Vol. 73. – P. 1–8. DOI: 10.1007/978-3-319-10653-3_1
10. Gonzalez, R.C. Digital Image Processing / R.C. Gonzalez, R.E. Woods // 4th Ed. Published by Pearson, 2018. – P. 1168.
11. Ханян, Г.С. Аналитическое исследование и оценка погрешностей в задаче измерения параметров гармонического сигнала методом преобразования Фурье / Г.С. Ханян // Измерительная техника. – 2003. – № 8. – С. 3–10.
12. Petrovsky, N.A. Two-dimensional non-separable quaternionic paraunitary filter banks / N.A. Petrovsky, E.V. Rybenkov, A.A. Petrovsky // IEEE Int. conf. on Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications // Poznan, Poland. – 2018. – P. 120–125. DOI: 10.23919/SPA.2018.8563311
13. Цветков, Э.И. Процессорные измерительные средства / Э.И. Цветков // Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 224 с.
14. Цветков, Э.И. Основы математической метрологии / Э.И. Цветков // СПб.: Политехника, 2005. – 510 с.
15. Мелентьев, В.С. Аппроксимационные методы и системы измерения и контроля параметров периодических сигналов / В.С. Мелентьев, В.И. Батищев // М.: Физматлит, 2011. – 240 с.

16. Prokhorov, S.A. Orthogonal models of structure functions / S.A. Prokhorov, V.V. Grafkin // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2011. – Vol. 47, no. 1. – P. 39–46.

DOI: 10.3103/S8756699011010067

17. John, W. Multidimensional signal, image, and video processing and coding / W. John // Academic Press is imprint of Elsevier, 2006.

18. Ponomareva, O. Evolution of forward and inverse discrete fourier transform / O. Ponomareva, A. Ponomarev, V. Ponomarev // *IEEE East-West Design & Test Symp.* – 2018. – P. 313–318.

DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524820

19. Ponomarev, V.A. Method for Effective Measurement of a Sliding Parametric Fourier Spectrum / V.A. Ponomarev, O.V. Ponomareva, A.V. Ponomarev // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* // 2014. – Vol. 50, iss. 2. – P. 132–138.

DOI: 10.3103/S8756699014020046

20. Пономарев, В.А. Инвариантность текущего энергетического Фурье-спектра комплексных дискретных сигналов на конечных интервалах / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева // *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника.* – 2014. – № 2. – С. 8–16.

21. Пономарев, В.А. Тенденции развития дискретных косвенных измерений параметров электрических сигналов / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева // *Метрология.* – 2017. – № 1. – С. 20–32.

References

1. Cooley J., Tukey J. An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. *Math. Comput.*, 1965, vol. 19, no. 90, pp. 297–301.

DOI: 10.2307/2003354

2. Oppenheim A.V., Schaffer R.W. Discrete-Time Signal Processing. *Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey*, 2009, p. 1120.

3. Sumathi S., Surekha P. LabVIEW based Advanced Instrumentation Systems. *Springer*, 2007, 728 p.

4. Bress T. Effective Labview Programming. New York: *NTC Press*, 2013, 720 p.

5. Folea S. LabVIEW - Practical Applications and Solutions. *InTech*, 2011, 472 p.

6. Richard G. Lyons. Understanding Digital Signal Processing (3rd Edition) 3rd Edition. *Prentice-Hall*, 2010, 210 p.

7. Finkelstajn L. [The science of measurements: analysis of the state and directions of development]. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems], 2010, no. 2, pp. 53–57 (in Russian).

8. Yaroslavsky L.P. Compression, restoration, resampling, ‘compressive sensing’ fast transforms in digital imaging. *Journal of Optics*, 2015, vol. 17, no. 7, p. 073001.

9. Favorskaya M.N., Jain L.C. Development of mathematical theory in computer vision. *Intelligent Systems Reference Library*, 2015, vol. 73, pp. 1–8.

DOI: 10.1007/978-3-319-10653-3_1

10. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital Image Processing. 4th Ed. Published by Pearson, 2018, 1168 p.

11. Hanyan G.S. [Analytical research and error estimation in the problem of measuring the parameters of a harmonic signal by the Fourier transform]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring technique], 2003, no. 8, pp. 3–10 (in Russian).

12. Petrovsky N.A., Rybenkov E.V., Petrovsky A.A. Two-dimensional non-separable quaternionic paraunitary filter banks. *IEEE Int. conf. on Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications*, Poznan, Poland, 2018, pp. 120–125.

DOI: 10.23919/SPA.2018.8563311

13. Cvetkov E.I. *Protseessornye izmeritel'nye sredstva* [Processor measuring tools]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1989, 224 p.

14. Cvetkov E.I. *Osnovy matematicheskoy metrologii* [Fundamentals of Mathematical Metrology]. Saint-Petersburg, Politekhnik Publ., 2005, 510 p.

15. Melent'ev V.S., Batishchev V.I. *Approximatsionnye metody i sistemy izmereniya i kontrolya parametrov periodicheskikh signalov* [Approximation methods and systems for measuring and controlling the parameters of periodic signals]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2011, 240 p.

16. Prokhorov S.A. Orthogonal models of structure functions. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2011, vol. 47, no. 1, pp. 39–46.

DOI: 10.3103/S8756699011010067

17. John W. Multidimensional signal, image, and video processing and coding. *Academic Press is imprint of Elsevier*, 2006.

18. Ponomareva O., Ponomarev A., Ponomarev V. Evolution of forward and inverse discrete fourier transform. *IEEE East-West Design & Test Symp.*, 2018, pp. 313–318. **DOI:** 10.1109/EWDTS.2018.8524820

19. Ponomarev V.A., Ponomareva O.V., Ponomarev A.V. Method for Effective Measurement of a Sliding Parametric Fourier Spectrum. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2014, vol. 50, iss. 2, pp. 132–138. **DOI:** 10.3103/S8756699014020046

20. Ponomarev V.A., Ponomareva O.V. Invariance of the current energy Fourier spectrum of complex discrete signals at finite intervals. *News of higher educational institutions of Russia. Radio electronics*, 2014, no. 2, pp. 8–16 (in Russian).

21. Ponomarev V.A., Ponomareva O.V. Trends in the development of discrete indirect measurements of the parameters of electrical signals. *Metrology*, 2017, no. 1, pp. 20–32 (in Russian).

УДК 620.179.14

Применение магнитошумового метода для контроля механической анизотропии ферромагнитных материалов

В.Н. Бусько, А.А. Осипов

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

Поступила 20.05.2019

Принята к печати 06.08.2019

Наличие анизотропии свойств ферромагнитных материалов предопределяет необходимость ее исследования и контроля, поскольку она оказывает существенное влияние на основные физико-механические характеристики деталей, изделий и конструкций. Цель работы заключалась в экспериментальном исследовании возможности применения магнитошумового метода для неразрушающего контроля механических свойств ферромагнитных материалов на примере коэффициента нормальной анизотропии R_n листового проката, механических напряжений при упругой деформации электротехнической стали и анизотропии физико-механических свойств ферромагнитных материалов.

Так как механическая анизотропия связана с магнитной анизотропией, при ее исследовании использовался магнитный метод на основе эффекта Баркгаузена (МЭБ), информативные параметры которого относятся к магнитоанізотропным. Сравнение результатов оценки анизотропии с помощью МЭБ на партии образцов штампуемой тонколистовой стали с измеренными производителем значениями R_n показало их близкое совпадение. Результаты исследований показали возможность оценки степени R_n с помощью МЭБ при применении его на производстве. Для изучения магнитной анизотропии в различных материалах и влияния на нее упругих напряжений растяжения и сжатия при изгибе с помощью МЭБ были изготовлены устройство для кругового вращения преобразователя Баркгаузена на поверхности исследуемого образца и устройство для формирования в образце упругих напряжений при изгибе.

Установлено, что упругая деформация в образцах электротехнической стали приводит к резкому изменению уровня магнитного шума и формы круговых диаграмм с учетом знака формируемых в образце напряжений. Установлено, что в результате холодной прокатки в процессе производства образцы электротехнической стали имеют ярко выраженную текстуру, обусловленную направлением проката листа. Создаваемые упругие напряжения в рассматриваемом диапазоне практически не меняют текстурированность – наведенную кристаллографическую анизотропию после прокатки материала.

Полученные с помощью магнитошумового метода результаты могут быть полезны при изучении, мониторинге и контроле анизотропии, кристаллографической текстуры, структурной неоднородности ферромагнитных материалов в виде листового проката, тонколистовой и рулонной стали, листовой штамповки и решении других задач с использованием магнитошумового метода в лабораторных и цеховых условиях.

Ключевые слова: анизотропия, деформация, изгиб, напряжения, магнитный шум.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-281-292

Адрес для переписки:

В.Н. Бусько
Ин-т прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: busko@iaph.bas-net.by

Address for correspondence:

V.N. Busko
Institute of Applied Physics of the National Academy of Science
of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus
e-mail: busko@iaph.bas-net.by

Для цитирования:

В.Н. Бусько, А.А. Осипов
Применение магнитошумового метода для контроля механической анизотропии ферромагнитных материалов.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 3. – С. 281–292.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-281-292

For citation:

V.N. Busko, A.A. Osipov
[Application of Magnetic Noise Method to Control the Mechanical Anisotropy of Ferromagnetic Materials].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 3, pp. 281–292 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-281-292

Application of Magnetic Noise Method to Control the Mechanical Anisotropy of Ferromagnetic Materials

V.N. Busko, A.A. Osipov

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

Received 20.05.2019

Accepted for publication 06.08.2019

Abstract

Presence of anisotropy of the ferromagnetic materials' properties determines the need for its research and control, since it has a significant impact on the basic physicomachanical characteristics of details, products and constructions. The aim of the work was to experimentally investigate the possibility of using the magnetic noise method for non-destructive testing of mechanical properties of ferromagnetic materials particularly value of the coefficient of normal anisotropy R_n of sheet metal, mechanical stresses under elastic deformation of electrical steel and the anisotropy of the physical and mechanical properties of ferromagnetic materials.

Since the mechanical anisotropy is related to the magnetic anisotropy, the magnetic method of the Barkhausen effect (MBE) was used in its study, the informative parameters of which belong to the group of magnetic anisotropy. Comparison of the results of anisotropy evaluation on a set of samples of stamped sheet steel using the MBE with values R_n measured by the manufacturer showed their close match. This revealed the possibility of R_n level evaluation using the MBE. Device for circular rotation of the Barkhausen transducer on the sample surface and device for forming of elastic bending stresses in the sample were constructed. To study the magnetic anisotropy in various materials and the impact of elastic tensile and compressive stresses by bending on it using the MBE.

It has been found that the elastic deformation in samples of electrical steel leads to dramatic change of the magnetic noise level and the shape of the circular diagrams, taking into account the sign of the stresses generated in the sample. It was established that as a result of cold rolling in the production process, electrical steel samples have a pronounced texture due to the direction of rolled sheet. The created elastic stresses in the considered range practically do not change the texture (induced crystallographic anisotropy) after the material rolling.

The results can be useful for studying, monitoring and testing of anisotropy, crystallographic texture, structural heterogeneity of ferromagnetic materials in the form of sheet metal, sheet steel and coil steel, sheet metal forming and for solving other problems using the magnetic noise method in laboratory and workshop conditions.

Keywords: anisotropy, strain, bending, stress, magnetic noise.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-281-292

Адрес для переписки:

В.Н. Бусько
Ин-т прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: busko@iaph.bas-net.by

Address for correspondence:

V.N. Busko
Institute of Applied Physics of the National Academy of Science
of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus
e-mail: busko@iaph.bas-net.by

Для цитирования:

В.Н. Бусько, А.А. Осипов
Применение магнитношумового метода для контроля механической
анизотропии ферромагнитных материалов.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 3. – С. 281–292.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-281-292

For citation:

V.N. Busko, A.A. Osipov
[Application of Magnetic Noise Method to Control the Mechanical
Anisotropy of Ferromagnetic Materials].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 3, pp. 281–292 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-281-292

Введение

На техническое состояние различных элементов деталей и изделий ферромагнитных конструкций существенное влияние оказывают различные виды анизотропии: механической, кристаллической, магнитной, напряжений, усталостной, коррозионной, зависящей от формы и материала образца, направления, вида и режима термической объемной и поверхностной обработки и др. Реакция изотропного и анизотропного материалов на внешнюю нагрузку имеет значительные количественные и качественные различия. Так, прочность и долговечность конструкции во многом (до 50 %) определяются наличием и степенью анизотропии и заметно зависят от направления приложения рабочей нагрузки [1, 2], а магнитные потери, к примеру, в электротехнической стали, также зависят от анизотропии [3, 4], что повышает актуальность изучения возможности ее контроля.

Наиболее распространенной является механическая анизотропия, которая присуща большинству материалов, изделий и конструкций, формируемая часто в процессе производства и эксплуатации. Существует постоянная потребность в оценке и неразрушающем контроле (НК) анизотропии свойств в производстве, например, при прокатке электротехнической стали [5], обыкновенной листовой [6], низкоуглеродистой стали Ст20 [7]. Особенно актуальной является задача НК анизотропии при изготовлении изделий из тонкого металлопроката, когда необходим НК механических свойств листовой стали, который, в основном, решается с помощью импульсного магнитного метода по остаточной намагниченности [8–10] и других магнитных характеристик [2–15].

При исследовании и контроле анизотропии наилучшие результаты показывают рентгеновские, магнитные, ультразвуковые и оптические методы [8], каждый из которых имеет свои сильные и слабые стороны, а также ограничения при использовании на производстве, как, например, рентгеновский. Вследствие того, что механическая анизотропия приводит к возникновению магнитной анизотропии, магнитные методы относятся к наиболее эффективным и достоверным при НК. К эффективным магнитным методам НК анизотропии материалов можно отнести и метод, основанный на эффекте Баркгаузена (МЭБ) [2, 12–16], информативные параме-

тры которого благодаря взаимосвязи со структурой материала несут информацию о перестройке его доменной структуры, тесно связанной с анизотропией его физико-механических характеристик. По различным данным, МЭБ и его параметры можно использовать при исследовании и НК степени анизотропии различных ферромагнитных материалов, а в ряде случаев МЭБ имеет преимущества перед другими физическими методами. В работе [2] на основе анализа экспериментальных данных показано, что параметры МЭБ однозначно относятся к магнитоанизотропным информативным параметрам, т. е. являются структурно-чувствительными, регистрирующими изменения магнитных свойств в различных направлениях.

В связи с этим целью работы являлось экспериментальное исследование возможности применения магнитошумового метода для неразрушающего контроля механических свойств ферромагнитных материалов на примере коэффициента нормальной анизотропии листового проката, механических напряжений при упругой деформации электротехнической стали и анизотропии физико-механических свойств ферромагнитных материалов.

Методика проведения эксперимента, конструкции устройств, образцы

В качестве метода исследования и НК магнитной анизотропии использовался МЭБ, а информативного параметра – интенсивность $U_{\text{эф}}$ магнитного шума (МШ), которая, в силу физической природы метода, относится к структурно-чувствительным магнитным величинам и проявляет свойства анизотропии [1]. Интенсивность $U_{\text{эф}}$ – среднеквадратичное значение э.д.с. магнитошумового сигнала, регистрируемого катушкой преобразователя Баркгаузена (ПБ) с осью, расположенной по нормали к контролируемой поверхности в определенных (оптимальных) полосах частотного спектра или временном интервале. Поэтому ее можно отнести к магнитоанизотропным характеристикам и использовать в качестве информативного и оценочного параметра.

Методика исследования анизотропии заключалась в измерении $U_{\text{эф}}$ вращающимся накладным ПБ в различных направлениях, получая и анализируя при этом круговые диаграммы ее распределения от угла поворота ПБ вокруг

оси на поверхности образца. Такая методика относится к наиболее оптимальным способам отображения и оценки степени магнитной анизотропии; U_{Φ} измерялась с помощью магнитошумового анализатора ИМШ [17] с ПБ, установленным в обойме устройства и с возможностью вращения на поверхности образца в обе стороны на 360° . Фотография внешнего вида устройства и его основных элементов показана на рисунке 1.



a



b

Рисунок 1 – Внешний вид устройства с преобразователем Баркгаузена для исследования и контроля анизотропии свойств ферромагнитных материалов: 1 – кольцо с лимбом; 2 – вращающаяся платформа; 3 – преобразователь Баркгаузена в обойме; a – угол между преобразователем Баркгаузена и направлением прокатки образца $\alpha = 0^\circ$; b – $\alpha = 45^\circ$

Figure 1 – Appearance of a device with a Barkhausen converter for studying and controlling of the anisotropy of the ferromagnetic materials properties: 1 – ring with limb; 2 – rotating platform; 3 – Barkhausen converter in the holder; a – angle between the Barkhausen converter and the sample rolling direction $\alpha = 0^\circ$; b – $\alpha = 45^\circ$

Устройство для кругового вращения состоит из кольца с лимбом 1, вращающейся платформы 2 и установленным на ней в обойме ПБ 3. Для повышения устойчивости устройства с ферромагнитным образцом оно имеет три опоры, выполненные из полосовых постоянных магнитов и закрепленные с помощью клея на нижней части кольца с лимбом 1 через 120° друг от друга. Внутри неподвижного кольца диаметром $\varnothing 130$ мм с нанесенными на нем угловыми метками (от 0 до 360° с ценой деления 5°) размещается подвижная платформа 2 с жестко установленным в обойме ПБ 3, регистрирующим U_{Φ} и расположенным так, чтобы ось измерительной катушки ПБ находилась нормально к поверхности образца. Благодаря круговому вращению платформы 2 с ПБ 3 в кольце 1 появляется возможность проводить измерения МШ на поверхности образца в различных направлениях с разным шагом. Наличие минимального люфта при вращении платформы с ПБ обеспечивает более высокие повторяемость и достоверность измерения МШ.

В качестве испытуемых использовались два образца (№ 1 и № 2) холоднокатанной анизотропной текстурованной электротехнической стали 3408 из разных партий в виде пластин длиной 500 мм, шириной 105 мм и толщиной 0,35 мм, обладающих, как правило, явно выраженной кристаллографической ориентацией. Исследование и оценка влияния коэффициента нормальной анизотропии тонколистового проката на МШ производились на образцах низколегированной стали (аналогичной низколегированной кипящей стали 08кп) в количестве 11 штук длиной и шириной 1000 мм и толщиной 0,8 мм, предоставленных комбинатом FQZ (Германия) с различными (вдоль и поперек) направлениями механической прокатки. При исследовании анизотропии свойств материалов с помощью МЭБ также использовались образцы из других марок сталей: высокопрочной высоколегированной (хромо-никель-титанистой) стали ВНС-2 в форме пластины длиной 200 мм, шириной 150 мм и толщиной 2 мм, конструкционной хромоникелевой низколегированной 10ХСНД – длиной 230 мм, шириной 160 мм и толщиной 2 мм, конструкционной низколегированной стали 09Г2С – длиной 700 мм,

шириной 600 мм и толщиной 6 мм, конструкционной стали 30ХГСА – длиной 110 мм, шириной 130 мм и толщиной 5 мм, а также отожженной конструкционной стали – длиной и шириной 150 мм, толщиной 2 мм.

Отметим, что при изучении анизотропии механических свойств материалов следует различать анизотропию свойств, определяемых при различных видах нагружения, например: анизотропию характеристик при статических растяжении, сжатии, кручении, изгибе, а также анизотропию прочности, ударной вязкости и др. В связи с этим изучалось влияние упругих деформаций при изгибе на круговые диаграммы и интенсивность МШ. В устройстве для реализации методики формирования напряжений при изгибе применялась трехточечная схема нагружения плоских образцов прямоугольной формы, приведенная на рисунке 2.

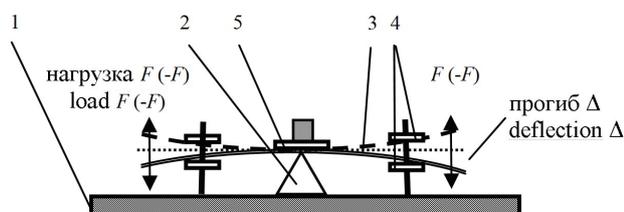


Рисунок 2 – Схема устройства для формирования упругих деформаций изгиба в анизотропных образцах электротехнической стали: 1 – основание; 2 – упор-призма; 3 – образец (нейтральное положение, растяжение, сжатие); 4 – прижимные пластины; 5 – устройство кругового вращения с преобразователем Баркгаузена

Figure 2 – Scheme of the device for formation of elastic bending deformations in anisotropic samples of electrical steel: 1 – base; 2 – stop-prism; 3 – sample (neutral position, tension, compression); 4 – pressure plates; 5 – circular rotation device with Barkhausen converter

Такая схема позволяет создавать упругие деформации изгиба, формируя в зависимости от направления усилия F различные напряжения растяжения и сжатия в образце. Учитывая, что любая деформация может вызывать анизотропию физико-механических свойств материала, а также наличие устройства вращения ПБ (рисунок 1), появилась возможность изучать влияние упругой и пластической деформации на уровень МШ при различных ориентациях ПБ на образце или направлениях обработки.

Исследование анизотропии механических свойств низколегированной тонколистовой стали

Для оценки чувствительности МШ к механическим свойствам листового проката выполнены экспериментальные исследования влияния механической анизотропии на интенсивность МШ на специально аттестованных предприятием-изготовителем образцах с измеренными значениями коэффициента нормальной анизотропии R_n , принятого в качестве меры степени анизотропии механических свойств листового материала и определяемого экспериментально при испытаниях материала на растяжение. Здесь $R_n = 0,25 (R_0 + 2R_{45} + R_{90})$, где $R_\varphi = (\ln b / \ln b_0) / (\ln h / \ln h_0)$; $\varphi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$; b и b_0 – текущая и первоначальная ширина; h и h_0 – текущая и начальная толщина образца.

На рисунке 3 представлены результаты оценки механической анизотропии с помощью магнитошумового анализатора ИМШ для образцов из низкоуглеродистой тонколистовой стали в зависимости от R_n , характеризующего изменение свойств материала в плоскости листового проката при растяжении на разрывной машине, при продольном и поперечном направлениях прокатки. График на рисунке 3а соответствует положению, когда ось направления перемагничивания магнитопровода ПБ совпадает с направлением прокатки вдоль листа, а на рисунке 3б – поперек направления прокатки. Видно, что результаты оценки R_n с помощью МЭБ имеют качественное совпадение с заявленными производителем коэффициентами нормальной анизотропии для образцов, а магнитошумовой параметр U_{φ} является чувствительным к анизотропии свойств ферромагнитного образца, т. е. относится к магнитоизотропным. Также видно, что коэффициент корреляции R^2 для направления перемагничивания ПБ вдоль прокатки несколько выше, чем для направления поперек прокатки ($R^2_{\parallel} = 0,5241$; $R^2_{\perp} = 0,4599$), что согласуется с данными работы [9], где сделан вывод о предпочтении использования продольного направления перемагничивания перед поперечным. Для увеличения коэффициента корреляции при оценке степени анизотропии механических свойств с помощью МЭБ необходимо провести дополнительные исследования при наличии большего количества исследуемых образцов и в зонах

с минимальной неоднородностью магнитных свойств по площади поверхности образца, оптимизируя режимы перемагничивания и анализа МШ.

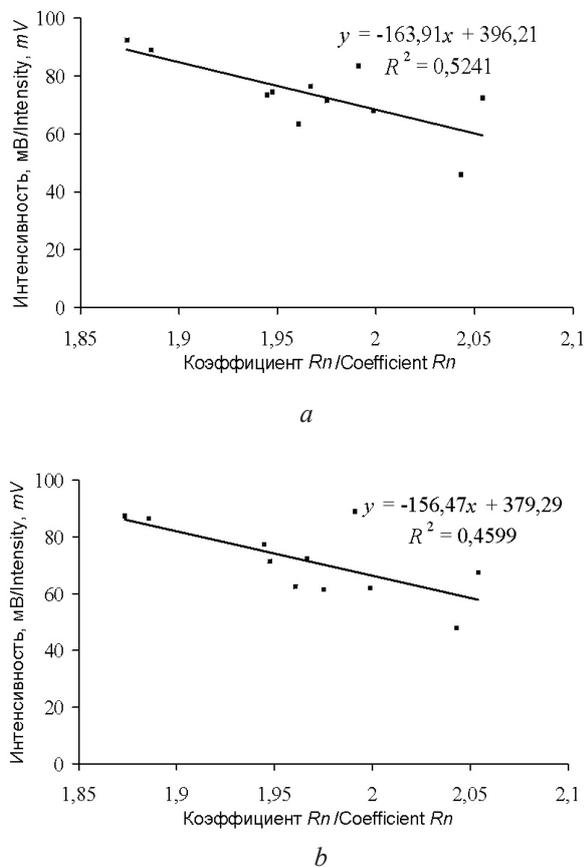


Рисунок 3 – Взаимосвязь интенсивности магнитного шума $U_{эф}$ с коэффициентом нормальной анизотропии R_n для образцов тонколистового проката при: a – продольном направлении прокатки; b – поперечном

Figure 3 – The relationship of the magnetic noise U_{eff} intensity with the coefficient of normal anisotropy R_n of rolled sheets' samples under: a – the longitudinal direction of rolling; b – the transverse one

Таким образом, полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод о том, что интенсивность МШ коррелирует с механической анизотропией и может служить информативным, а в ряде случаев и количественным параметром, что особенно важно при экспресс-оценке степени анизотропии, мониторинге и НК механических свойств тонколистового проката при его производстве и отработке техпроцесса, а МЭБ может быть использован как самостоятельный или дополнительный при решении данной задачи.

Влияние упругой деформации изгиба на анизотропию магнитного шума

При изучении и оценке чувствительности МШ к анизотропии свойств посредством вращения ПБ и анализа экспериментальных данных наиболее удобно использовать круговые (угловые диаграммы [14]), характеризующие изменение МШ в зависимости от угла поворота α ПБ вокруг оси на поверхности образца в координатах $U_{эф}$ и α . Измерения $U_{эф}$ производились при амплитуде тока в ПБ $i = 96$ мА и частоте перемагничивания $f = 128$ Гц. На рисунке 4 показаны круговые диаграммы зависимости $U_{эф}$ от α ПБ на поверхности образцов № 1 и № 2 холоднокатанной анизотропной электротехнической стали при различных значениях и знаке создаваемых упругих напряжений при изгибе, полученных с помощью показанных на рисунке 1 устройства для вращения ПБ на образце и на рисунке 2 схемы его деформирования.

Расчет значений упругих напряжений растяжения σ_+ и сжатия σ_- при изгибе производился с помощью стандартных формул при известных значениях приложенной нагрузки F , измеренной электронным динамометром (или с помощью грузиков); величины прогиба Δ , измеренной индикатором часового типа; площади сечения образца S и модуля Юнга E для стали. Из представленных на рисунках 4а и 4b диаграммах следует, что в обоих образцах, особенно в образце № 1, в недеформированном состоянии присутствует магнитная анизотропия, регистрируемая МЭБ. Максимум значения $U_{эф}$ для образца № 1 наблюдался вдоль направления «160°–340°» (а не «0°–180°»), т. е. наиболее близкого к направлению деформации прокатки, что свидетельствует о выявлении магнитной анизотропии, совпадающей с осью легкого намагничивания [2]. В образце № 2 максимум $U_{эф}$ совпадал с направлением «0°–180°» с небольшим смещением диаграмм влево относительно центральной оси вращения ПБ. Видно, что рост упругих напряжений растяжения и сжатия при изгибе обоих образцов приводит к резкому изменению уровня МШ с учетом знака напряжений. Для образца с положительной константой магнитострикции при росте σ_+ при изгибе уровень МШ возрастает, при росте σ_- – снижается, степень изменения МШ в результате упругой деформации и вид диаграмм

зависят от степени деформации. Видно, что в результате холодной прокатки путем штамповки благодаря наличию в стали физико-кристаллографических свойств, листы имеют ярко выраженную текстуру, приводящую к анизотропии, обусловленную направлением прокатки вдоль длины листа и совпадающей с осью «0°–180°». Уровень МШ вдоль направления прокатки, соответствующий более высоким магнитным свойствам материала – магнитной проницаемости и магнитной индукции, значительно превышает другие направления значений интенсивности МШ. Для образца № 1 в недеформированном состоянии отношение ($U_{\text{эф max}}/U_{\text{эф min}}) \approx 3,2\text{--}3,5$ раза, для № 2 – при-

мерно 2. Если учесть, что анизотропия магнитных свойств, характеризуемая $U_{\text{эф}}$, преимущественно совпадает с анизотропией механических свойств [2], то можно сделать вывод о взаимосвязи МШ с механической анизотропией и ее надежного выявления с помощью МЭБ, а также о возможности ее использования для определения преимущественного направления физико-механических свойств. При этом характер круговых диаграмм показывает, что деформация практически не меняет текстурированность – направление наведенной анизотропии, вызванной прокаткой, т. к. для обоих образцов $U_{\text{эф}}$ и вид круговых диаграмм отличаются друг от друга в зависимости от угла α .

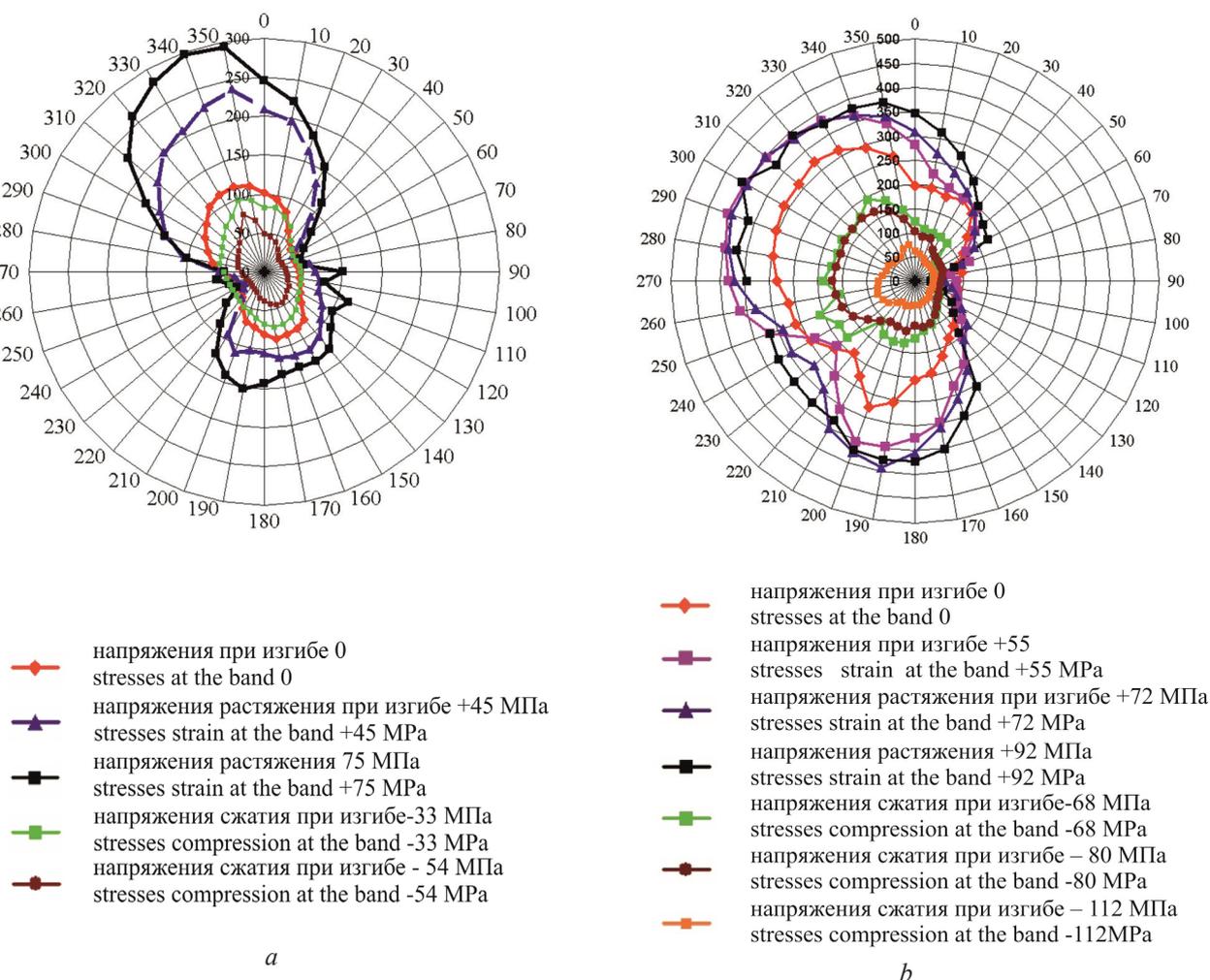


Рисунок 4 – Круговые диаграммы зависимости магнитного шума от угла поворота преобразователя Баркгаузена на поверхности двух образцов электротехнической стали 3408 при различных уровнях и знаках упругих деформаций изгиба: *a* – образец № 1; *b* – образец № 2

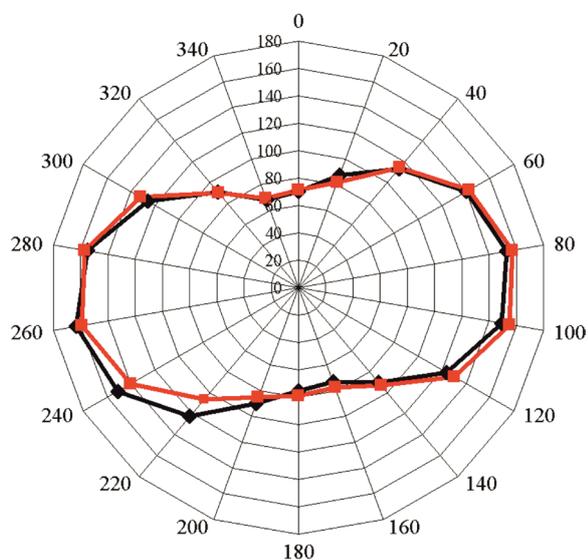
Figure 4 – Pie charts of magnetic noise dependence on the angle of rotation of the Barkhausen transducer on the surface of two samples of 3408 electrical steel at various levels and signs of elastic bending deformations: *a* – sample № 1; *b* – sample № 2

Таким образом, упругая деформация образцов электротехнической стали при статическом изгибе в исследуемом диапазоне напряжений, по результатам измерения МШ, не привела к возникновению заметной дополнительной механической анизотропии. Полученные результаты совпали с данными, полученными в работе [16] при исследовании упругой деформации в материалах с положительной константой магнитострикции при статическом растяжении и статическом сжатии, когда при растяжении информативный параметр МЭБ также возрастает, а при сжатии – снижается.

Исследование магнитной анизотропии различных материалов

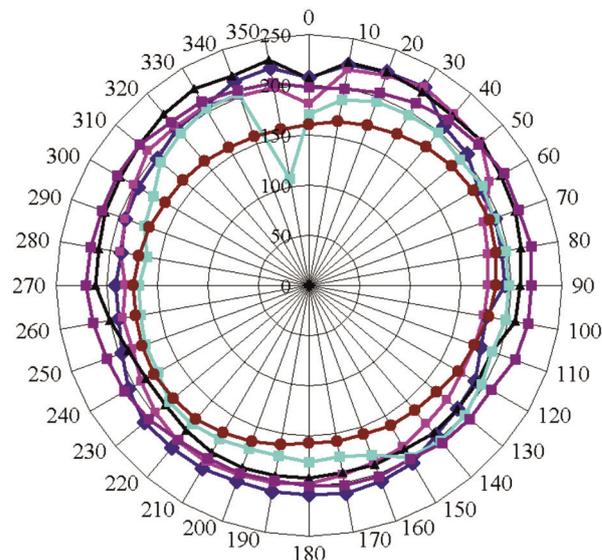
Для сравнения с представленными на рисунке 4 экспериментальными круговыми диаграммами зависимости $U_{эф}$ от α для электротехнической стали 3408 на рисунке 5 показаны круговые диаграммы МШ, полученные на образцах стали ВНС-2 (рисунок 5a), стали 09Г2С (рисунок 5b), 10ХСНД (рисунок 5c) и конструкционной легированной стали (рисунок 5d).

Из анализа рисунка 5a видно, что, по данным измерения МШ, в образце холоднокатаной жаропрочной высоколегированной коррозионностойкой стали ВНС-2 присутствует магнитошумовая анизотропия, обусловленная появлением механической анизотропии в процессе производства стали при прокатке. Максимум $U_{эф}$ наблюдается вдоль оси «(90°–85°)–(270°–265°)», практически совпадающей с видимым на образце направлением прокатки. Диаграмма, показанная на рисунке 5b, свидетельствует о незначительной магнитошумовой анизотропии в образце свариваемой стали 09Г2С, имеющей в исходном состоянии ферритно-перлитную мелкозернистую (средний размер зерен феррита равен примерно 10–20 мкм) и преимущественно, по данным металлографии, однородную структуру, которая не оказывает значительного влияния на магнитную анизотропию и на МШ. Независимо от местоположения точек измерения МШ по поверхности образца, включая обратную его сторону, значения $U_{эф}$ также остаются близкими между собой, что подтверждает высокую структурную однородность образца.



—♦— точка 1
point 1
—■— точка 2 в 3 см от 1-й
point 2 in 3 cm

a



—♦— точка 1 на стороне 1
point 1 on side 1
—■— точка 2
point 2
—▲— точка 3
point 3
—■— точка 4
point 4
—■— точка 3 с обратной стороны листа
point 3 on the back side of the sheet
—●— точка 2 с обратной стороны
point 2 on the back side of the sheet

b

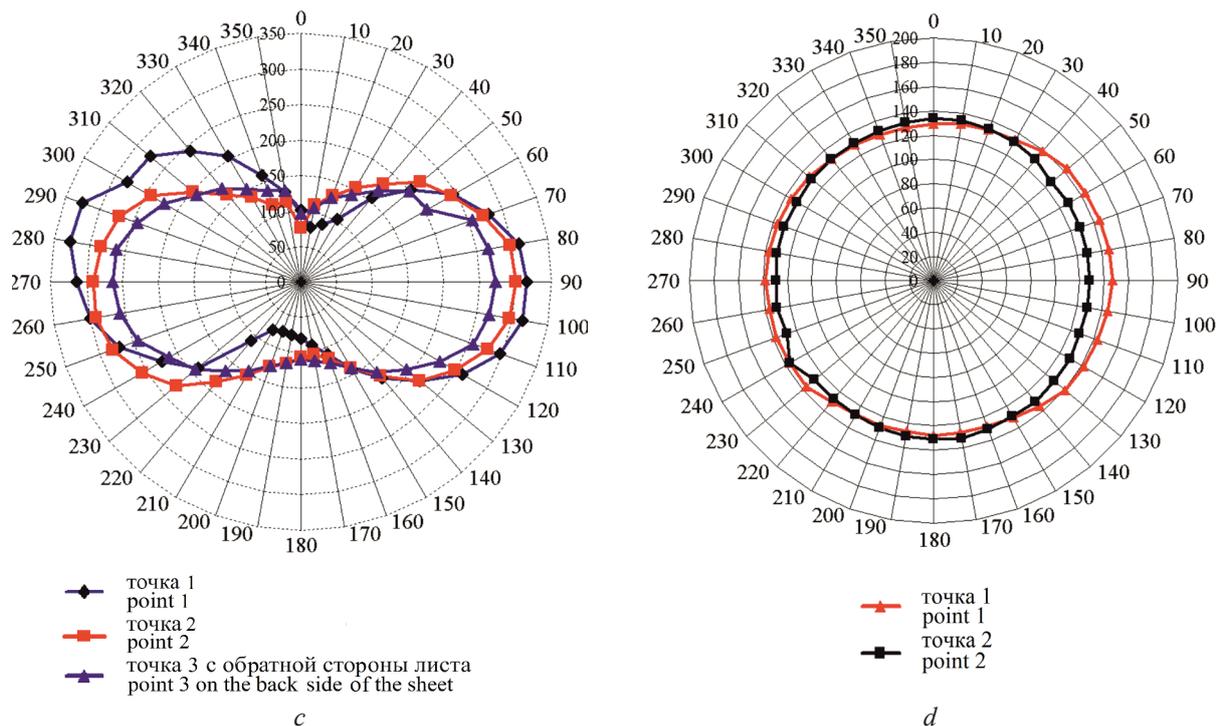


Рисунок 5 – Круговые диаграммы зависимости магнитного шума от угла поворота преобразователя Баркгаузена на поверхности образцов: *a* – высокопрочная высоколегированная сталь ВНС-2; *b* – низколегированная сталь 09Г2С; *c* – низколегированная сталь 10ХГСНД; *d* – изотропная конструкционная отожженная сталь

Figure 5 – Pie charts of magnetic noise dependence on the angle of rotation of the Barkhausen transducer on the sample surface: *a* – high-strength high-alloy steel VNS-2; *b* – low-alloy steel 09G2S; *c* – low-alloy steel 10HSND; *d* – isotropic structural annealed steel

Анализ представленной на рисунке 5с круговой диаграммы зависимости $U_{\text{эф}}$ от α для стали 10ХГСНД показал, что она имеет вытянутую форму строго вдоль направления оси «90°–270°», соответствующего максимальным значениям $U_{\text{эф}}$ и совпадает с направлением механической шлифовки, приводящей к росту растягивающих остаточных напряжений, в том числе, и под влиянием важного для легированных сталей теплового фактора [16].

Пример изменения $U_{\text{эф}}$ изотропной и отожженной конструкционной стали представлен на рисунке 5d, из которого следует, что распределение $U_{\text{эф}}$ от α характеризует практически магнитошумовую изотропность и структурную однородность стали, когда при любых положениях датчика в различных точках образца зависимости $U_{\text{эф}}$ от α остаются практически постоянными и представляют собой концентрически ровные окружности, свидетельствующие об отсутствии магнитной анизотропии или оценке однородности. Отметим, что данный образец характеризовался высокой степенью чистоты обработки по-

верхности, что также обеспечило уменьшение погрешности измерения МШ.

Таким образом, экспериментально установлена корреляционная зависимость между интенсивностью магнитного шума и анизотропией физико-механических свойств ряда ферромагнитных материалов.

Заключение

Для экспериментального исследования возможности применения магнитошумового метода для неразрушающего контроля механических свойств ферромагнитных материалов изготовлены устройство для кругового вращения (от 0° до 360° с ценой деления 5°) преобразователя Баркгаузена на поверхности исследуемого ферромагнитного образца и устройство для формирования в образце упругих деформаций изгиба.

На основе сопоставления полученных с помощью метода эффекта Баркгаузена результатов и предоставленных изготовителем образцов штампуемой тонколистовой стали с известными

коэффициентами нормальной анизотропии сделан вывод о том, что имеется качественное и удовлетворительное количественное совпадение зависимостей, свидетельствующее о наличии взаимосвязи магнитного шума с механическими свойствами и возможности использования метода эффекта Баркгаузена для изучения и контроля механических свойств.

Установлено, что упругие напряжения растяжения (в диапазоне от 0 до ≈ 70 МПа) и сжатия (в диапазоне от 0 \approx до -120 МПа) при изгибе образцов электротехнической стали приводят к резкому изменению уровня магнитного шума с учетом знака формируемых напряжений. Степень изменения магнитного шума, а также вид круговых диаграмм зависят от величины и знака создаваемых механических напряжений в образце. Показано, что в результате деформации от холодной прокатки листы стали имеют ярко выраженную текстуру, формируемую направлением проката вдоль длины листа. Значения интенсивности магнитного шума вдоль направления прокатки, соответствующие более высоким магнитным свойствам стали, значительно (примерно в 2–3,5 раза) превышают другие направления измеренных значений магнитного шума. Создаваемые упругие напряжения растяжения и сжатия при деформациях изгиба в рассматриваемом диапазоне их изменения практически не меняют текстурированность, или наведенную анизотропию, вызванную прокаткой.

Степень магнитной анизотропии, характеризующаяся изменением интенсивности магнитного шума и формой круговых диаграмм, относится к информативным параметрам, позволяющим выявлять и оценивать степень естественной и наведенной анизотропии при производстве и эксплуатации изделий из ферромагнитных материалов. Отличие и особенности оценки анизотропии с помощью метода эффекта Баркгаузена от аналогов состоит в высокой чувствительности и производительности, универсальности и снижении требований к размагничиванию изделий перед контролем, относительной простоте и малой стоимости реализации метода.

Таким образом, полученные результаты по исследованию возможности применения магнитношумового метода неразрушающего контроля механической анизотропии физико-механических свойств показали эффективность и пригодность метода, который может быть применен

в лабораторных и заводских условиях в качестве самостоятельного, дополнительного или экспресс-метода: например, при контроле и оценке механической анизотропии, текстуры, структурной неоднородности и других свойств листового проката, тонколистовой и рулонной стали, листовой штамповки и решения других задач.

Список использованных источников

1. Radchenko, A.V. Numerical modeling of development of fracture in anisotropic composite materials at low-velocity loading / A.V. Radchenko, P.A. Radchenko // Journal of Materials Science. – 2010. – Vol. 46, no. 8. – P. 2720–2725.
DOI: 10.1007/s10853-010-5142-8
2. Gorkunov, E.S. Barkhausen Noise and its Utilization in Structural Analysis of Ferromagnetic Materials, Review Article I. / E.S. Gorkunov, Y.N. Dragoschanski // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 1999. – No. 6. – P. 3–23.
3. Туунов, В.Ф. Контроль неоднородности магнитной проницаемости листовой анизотропной электротехнической стали // Дефектоскопия. – 2019. – № 3. – С. 46–49.
4. Korzunin, G.S. The effect of the Anisotropy of Magnetic Properties of electrical steel on losses in power transformer cores / G.S. Korzunin [et al.] // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2010. – Vol. 46, no. 9. – P. 632–637.
DOI: 10.1134/S1061830910090020
5. Borsutzki, M. Magnetische und akustische Verfahren zur Materialcharakterisierung von Stahlblechen / M. Borsutzki, J. Kroos, W. Reimche, E. Schneider // Stahl und Eisen, 120 (2000), H. 12. – P. 115–121.
6. Korzunin, G.S. Effect of Mechanical Stresses on the Magnetic Properties of Anisotropic electrical steel / G.S. Korzunin, R.B. Puzhevich, M.B. Tsyrlin // The Physics of Metals and Metallography. – 2007. – Vol. 103, no. 2. – P. 142–151. **DOI:** 10.1134/S0031918X07020044
7. Nichipuruk, A.P. Induced magnetic anisotropy in low-carbon steel plates subjected to plastic deformation by stretching / A.P. Nichipuruk, A.N. Stashkov, M.S. Ogneva, A.V. Korolev, A.A. Osipov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – Vol. 51, no. 10. – P. 610–615.
DOI: 10.1134/S1061830915100095
8. Матюк, В.Ф. Состояние неразрушающего контроля шtumпемости листового проката сталей // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2012. – № 3. – С. 3–24.
9. Счастный, А.С. Исследование возможности контроля анизотропии листового проката / А.С. Счаст-

ный, А.А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2014. – № 3. – С. 20–33.

10. Matyuk, V.F. Modern state of Nondestructive testing of Mechanical properties and stamping ability of steel sheets in a manufacturing technological flow / V.F. Matyuk., S.A. Goncharenko, H. Hartmann, H. Reichelt // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2003. – Vol. 39, no. 5. – P. 347–380.

DOI: 10.1023/B:RUNT.0000011264.99280.de

11. Bida, G.V. Multiparameter methods in magnetic structuroscopy and nondestructive testing of mechanical properties of steels / G.V. Bida, A.P. Nichipuruk // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2007. – Vol. 43, no. 8. – P. 493–509.

DOI: 10.1134/S1061830907080013

12. Gorkunov, E.S. Barkhausen Noise and its Utilization in Structural Analysis of ferromagnetic Materials, Review Article V. / E.S. Gorkunov, Y.N. Dragoschanski, M. Mikhovski // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2000. – V. 36, no. 6. – P 389–417. **DOI:** 10.1007/BF02759376

13. Ivanova, Y. Comparative measurements of the stress state in a rolled carbon steel using magnetic barkhausen noise and ultrasonic method / Y. Ivanova, T. Partalin // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2012. – Vol. 48, no. 2. – P. 137–146.

DOI: 10.1134/S1061830912020040

14. Венгринович, В.Л. Новые возможности НК напряжений методом эффекта Баркгаузена / В.Л. Венгринович [и др.] // В мире неразрушающего контроля. – 2005. – № 1 (27). – С. 36–39.

15. Iordache, V.E. Effect of mechanical strains on the magnetic properties of electrical steels / V.E. Iordache., E. Hug // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. – December 2004. – Vol. 6, no. 4. – P. 1297–1303.

16. Филинов, В.В. Применение метода магнитных шумов для контроля технологических напряжений / В.В. Филинов [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2005. – № 3. – С. 17–22.

17. Бусько, В.Н. Лабораторная система для исследования усталостной деградации ферромагнитных материалов и примеры ее реализации / В.Н. Бусько, Д.А. Винтов // Приборы и методы измерений. – 2012 – № 2 (5). – P. 33–39.

References

1. Radchenko A.V., Radchenko P.A. Numerical modeling of development of fracture in anisotropic composite materials at low-velocity loading. *Journal of Materials Science*, 2010, vol. 46, no. 8, pp. 2720–2725.

DOI: 10.1007/s10853-010-5142-8

2. Gorkunov E.S., Dragoschanski Y.N. Barkhausen Noise and its Utilization in Structural Analysis of Ferro-

magnetic Materials, Review Article I. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 1999, no. 6, pp. 3–23.

3. Tiunov V.F. [Monitoring of the magnetic permeability heterogeneity of anisotropic electrical steel sheets] *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 2019, no. 3, pp. 46–49. (in Russian).

4. Korzunin G.S., Bulychev O.A., Sysolyatina I.P., Chistyakov V.K. The effect of the Anisotropy of Magnetic Properties of electrical steel on losses in power transformer cores. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2010, vol. 46, no. 9, pp. 632–637.

DOI: 10.1134/S1061830910090020

5. Borsutzki M., Kroos J., Reimche W., Schneider E. Magnetische und akustische Verfahren zur Materialcharakterisierung von Stahlblechen, *Stahl und Eisen*, 2000, 120, H. 12, pp. 115–121.

6. Korzunin G.S., Puzhevich R.B., Tsyrlin M.B. Effect of Mechanical Stresses on the Magnetic Properties of Anisotropic electrical steel. *The Physics of Metals and Metallography*, 2007, vol. 103, no. 2, pp. 142–151.

DOI: 10.1134/S0031918X07020044

7. Nichipuruk A.P., Stashkov A.N., Ogneva M.S., Korolev A.V., Osipov A.A. Induced magnetic anisotropy in low-carbon steel plates subjected to plastic deformation by stretching. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, vol. 51, no. 10, pp. 610–615.

DOI: 10.1134/S1061830915100095

8. Matyuk V.F. [The state of non-destructive testing of the stampability of sheet steel for steel]. *Nerazrushayushhij kontrol' i diagnostika* [Nondestructive Testing and Diagnostics], 2012, no. 3, pp. 15–42 (in Russian).

9. Schastnyj A.S., Happily A.S., Osipov A.A. [Study of the possibility of controlling sheet metal anisotropy]. *Nerazrushayushhij kontrol' i diagnostika* [Nondestructive testing and diagnostics], 2014, no. 3, pp. 20–33 (in Russian).

10. Matyuk V.F., Goncharenko S.A., Hartmann H., Reichelt H. Modern state of Nondestructive testing of Mechanical properties and stamping ability of steel sheets in a manufacturing technological flow. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2003, vol. 39, no. 5, pp. 347–380.

DOI: 10.1023/B:RUNT.0000011264.99280.de

11. Bida G.V., Nichipuruk A.P. Multiparameter methods in magnetic structuroscopy and nondestructive testing of the mechanical properties of steels. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2007, no. 8, pp. 3–24.

DOI: 10.1134/S1061830907080013

12. Gorkunov E.S., Dragoschanski Y.N., Mikhovski M. Barkhausen Noise and its Utilization in Structural Analysis of ferromagnetic Materials, Review Article V. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2000, vol. 36, no. 6, pp. 389–417. **DOI:** 10.1007/BF02759376

13. Ivanova Y., Partalin T. Comparative Measurements of the Stress State In A Rolled Carbon Steel Using

Magnetic Barkhausen Noise And Ultrasonic Methods. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2012, vol. 48, no. 2, pp. 137–146.

DOI: 10.1134/S106183091202004014.

14. Vengrinovich V.L., Tsukerman V.L., Denkevich Yu.B. [New possibilities of NK voltages by the Barkhausen effect method]. *V mire nerazrushayushhego kontrolya* [In the world of nondestructive testing], no. 1 (27), March 2005, pp. 36–39 (in Russian).

15. Iordache V.E., Hug E. Effect of mechanical strains on the magnetic properties of electrical steels.

Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, December 2004, vol. 6, no. 4, pp. 1297–1303.

16. Filinov V.V., Shaternikov V.E., Rukavishnikov I.V. [Application of the magnetic noise method for the control of process voltages]. *Kontrol'. Diagnostika* [Control. Diagnostics], 2005, no. 3, pp. 17–22 (in Russian).

17. Busko V.N., Vintov D.A. [Laboratory system for investigation of the fatigue degradation in ferromagnetic materials and examples of its implementation]. *Pribory i metody izmerenij* [Devices and Methods of Measurements], 2012, no. 2 (5), pp. 33–39 (in Russian).

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Статьи, направленные в редакцию журнала, должны удовлетворять требованиям «Инструкции о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации)...», утвержденной Постановлением ВАК РБ 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, jpg, разрешение не менее 300 dpi**). Все рисунки нумеруются и сопровождаются подрисуночными подписями. Фрагменты рисунка обозначаются строчными курсивными латинскими буквами – «a», «b» и т. д. Надписи на рисунках и подписи к рисункам даются на русском и английском языках. Все сокращения и обозначения на рисунках должны быть расшифрованы в подрисуночной подписи. Рисунки желательно предоставлять в цвете.

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, расширяются 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 (grad, div, ln, min, max и др.), 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 вверху 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 предоставляют 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 described.
 8. Tables should be placed directly in the article body. Diagrams and tables should not contain the same information. Each table should have the title. All tables, diagrams and figures should be referenced in the text.
 9. Symbols and abbreviations which are used in articles should be deciphered directly in the text and also (if necessary) taken out on a separate page.
 10. Dimensions of all quantities used in the article should correspond to International System of Units.
 11. Formulas should be typed in MathType.
 12. List of References is to be placed at the end of the article with full bibliographic information. Order of references should correspond to the order of their occurrence in the text. It is not recommended to refer to conference proceedings, papers from electronic journals without *DOI* number, textbooks, internet resources. References on unpublished works are prohibited. It is recommended to refer to not less than 10 references, self-citations – not more than 20 %/
 13. The following information about every co-author should be presented: family name, first name, patronymic (or second) name (if there are any), scientific degree and title, organization and position, full address with the postal code for correspondence, office or mobile phone numbers, fax, e-mail.
 14. Articles containing investigation results obtained in organizations should have a corresponding permission for publication.
 15. Names of Foundations or Programs financially granted the research may be acknowledged in the end of the text.
 16. Authors are responsible for submitting articles previously published or accepted by other publisher.
 17. Articles not meeting the requirements of the Editorial Board would not be accepted and may be returned to the authors. The date of receipt is considered to be the day when the Editorial Board receives the author's original paper.
 18. Authors conducting postgraduate (graduate studies, doctoral studies) have a priority in publishing their articles out of queue in the year of completion. Authors do not pay for publishing scientific articles. The Editorial Board can shorten and/or change the text if it does not strain the meaning of the article.
-

Индексы:
74835; 748352