

# 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 14**

**№ 2**

**2023**

---

## 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, профессор кафедры «Лазерная техника и технология» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

**Анищик В.М.**, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры физики твёрдого 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 технического университета (г. Люблин, Польша)

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

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

---

**Кулешов Н.В.**, член-корреспондент НАН Беларуси, 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 «Белмикроанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Беларусь)  
**Плескачевский Ю.М.**, член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор (г. Минск, Беларусь)  
**Погребняк А.Д.**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой нанозлектроники Сумского государственного университета (г. Сумы, Украина)  
**Распопов В.Я.**, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Приборы управления» Тульского государственного университета (г. Тула, Россия)  
**Це Ли**, заместитель директора Северо-Восточного НИИ техники датчиков (г. Харбин, КНР)  
**Чижик С.А.**, академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор, Первый заместитель Председателя Президиума НАН Беларуси, заведующий кафедрой «Микро- и нанотехника» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)  
**Шкадаревич А.П.**, академик НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, директор НТЦ «ЛЭМТ» Белорусского оптико-механического объединения (г. Минск, Беларусь)  
**Юмашев К.В.**, д.ф.-м.н., профессор, 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.**

**Ведущий научный редактор: Шахлевич Л.Н.**

**Технический редактор: Чабарова О.Л.**

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

**Подписано в печать 07.07.2023. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная.**

**Гарнитура Times New Roman. Печать цифровая. Усл. печ. л. 9,3. Уч.-изд. л. 6,62. Тираж 60 экз.**

**Дата выхода в свет 12.07.2023. Заказ № 574.**

**Отпечатано в Белорусском национальном техническом университете. ЛП № 38200000006896 от 03.03.2014.**

**Пр-т Независимости, 65, 220013, г. Минск**

#### **АДРЕС РЕДАКЦИИ:**

**Белорусский национальный технический университет  
пр-т Независимости, 65, 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 14**

**№ 2**

**2023**

---

**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, Laser Equipment and Technology Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

**EDITORIAL BOARD**

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

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

---

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

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

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

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

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

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

**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, Control Devices Department, Tula State University (Tula, Russia)

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

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

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

**Konstantin V. Yumashev**, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, 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](mailto:pimi@bntu.by)  
<http://pimi.bntu.by>

## СОДЕРЖАНИЕ

### Средства измерений

*В.А. Стрижак, А.В. Пряхин*

|                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Оптимизация параметров намагничивающего устройства электромагнитно-акустического преобразователя для контроля легированных сталей..... | 81 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

*П.С. Богдан, Е.Г. Зайцева, И.А. Ковалёнок, Т.Д. Тарасенко, Е.В. Дубойский*

|                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Использование линзы Френеля в светодиодных источниках локального освещения для оптимизации распределения освещённости рабочей плоскости ( <i>in English</i> )..... | 96 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

*В.А. Алексеев, С.И. Юран, М.Р. Зарипов, В.П. Усольцев*

|                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Проект автономного микрокатера с лазерным устройством для оценки загрязнения микропластиком акватории водоёмов..... | 106 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

### Методы измерений, контроля, диагностики

*А.П. Крень, М.Н. Делендик, О.В. Мацулевич, О.К. Гусев, К.В. Пантелеев, Р.И. Воробей*

|                                                                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Применение метода дифракции рентгеновских лучей для изучения напряжённого состояния поверхности металла при статическом и ударном деформировании..... | 115 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

*А.В. Исаев, Ю.В. Суходолов, К.А. Любинский, А.И. Голубович*

|                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Анализ состояния электрических машин путём измерения межвиткового сопротивления в его обмотках..... | 126 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

*Р.И. Воробей, О.К. Гусев, А.Л. Жарин, В.А. Микитевич, К.В. Пантелеев, А.В. Самарина, А.И. Свистун, А.К. Тявловский, К.Л. Тявловский*

|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Измерение электрического потенциала поверхности с использованием статического зонда... | 135 |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|

*С.Г. Сандомирский, А.Л. Валько, С.П. Руденко*

|                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Методика определения эффективной толщины цементированного слоя стали ( <i>in English</i> )..... | 145 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

## CONTENTS

### Measuring Instruments

|                                                                                                                                                                                                                                  |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>V.A. Strizhak, A.V. Pryakhin</i><br><b>Optimization of the Parameters of the Magnetizing Device of the Electromagnetic-Acoustic Transducer (in Russian).....</b>                                                              | <b>81</b>  |
| <i>P.S. Bogdan, E.G. Zaytseva, I.A. Kovalenok, T.D. Tarasenko, E.V. Dubovsky</i><br><b>The Use of Fresnel Lenses in LED Sources of Local Illumination to Optimize the Distribution of Illumination of the Working Plane.....</b> | <b>96</b>  |
| <i>V.A. Alekseev, S.I. Yuran, M.R. Zaripov, V.P. Usoltsev</i><br><b>The Project of an Autonomous Microboat with a Laser Device for Estimation of Water Area Pollution by Microplastic (in Russian).....</b>                      | <b>106</b> |

### Methods of Measurements, Monitoring, Diagnostics

|                                                                                                                                                                                                                                       |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>A.P. Kren, M.N. Delendik, O.V. Matsulevich, O.K. Gusev, K.U. Pantsialeu, R.I. Vorobey</i><br><b>X-ray Diffraction Method in the Study of a Metal Surface Stress State under Static and Impact Deformation (in Russian).....</b>    | <b>115</b> |
| <i>A.V. Isaev, U.V. Suchodolov, K.A. Lyubinsky, A.I. Golubovich</i><br><b>Analysis of Electrical Machines' State by Measuring the Interturn Resistance in Its Windings (in Russian).....</b>                                          | <b>126</b> |
| <i>R.I. Vorobey, O.K. Gusev, A.L. Zharin, V.A. Mikitsevich, K.U. Pantsialeu, A.V. Samarina, A.I. Svistun, A.K. Tyavlovsky, K.L. Tyavlovsky</i><br><b>Surface Electric Potential Measurement with a Static Probe (in Russian).....</b> | <b>135</b> |
| <i>Sergei G. Sandomirski, Aleksandr L. Val'ko, Sergej P. Rudenko</i><br><b>Methodology for Determining the Effective Thickness of the Cemented Layer of Steel.....</b>                                                                | <b>145</b> |



DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-81-95

# Оптимизация параметров намагничивающего устройства электромагнитно-акустического преобразователя для контроля легированных сталей

В.А. Стрижак, А.В. Пряхин

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

Поступила 04.03.2023

Принята к печати 14.06.2023

Бесконтактные электромагнитно-акустические преобразователи обладают набором значительных преимуществ по сравнению с контактными преобразователями, но при этом у них есть существенные недостатки, требующие разработки эффективных намагничивающих устройств. По сравнению с устройствами намагничивания на постоянных магнитах устройства намагничивания электрическим током легко снимаются с объекта контроля и очищаются от загрязнения металлическими частицами. К сожалению, такие преобразователи имеют значительные габариты и массу.

Разработан преобразователь, содержащий магнитопровод, намагничиваемый катушкой с электрическим током, и два независимых электромагнитных индуктора, расположенных в зазоре между центральной частью магнитопровода и объектом контроля. Индукторы представляют собой две плоские катушки, каждая из которых выполнена в виде бабочки. Проводники индукторов, расположенные в рабочей области, имеют взаимно перпендикулярные направления; с их помощью можно эффективно возбуждать и регистрировать поперечно поляризованные акустические волны без перестановки преобразователя. С целью уменьшения габаритных размеров и массы преобразователя произведена оптимизация массогабаритных параметров намагничивающего устройства для условий эксплуатации, когда намагничивание объекта контроля и измерения производятся во время активной фазы измерения. Во время пассивной фазы измерения, в три раза превышающей активную фазу по времени, происходит остывание намагничивающего устройства. Циклический режим с чередованием активной и пассивной фаз позволил уменьшить вес преобразователя более чем в 3 раза. В рабочей зоне преобразователя размером 15×15 мм при зазоре в 1 мм между концентратором магнитного поля и объектом контроля создаётся поле с нормальной компонентой в 2,4 Тл.

Преобразователь содержит защиту устройства намагничивания от перегрева, а циклический режим работы позволяет обеспечить непрерывную производительность до 30 измерений в минуту при температуре окружающей среды 20 °С.

Разработанное намагничивающее устройство может быть использовано при решении ряда задач структуроскопии, толщинометрии, дефектоскопии электромагнитно-акустическими методами, основанными на точном измерении времени распространения упругих волн в объекте контроля.

**Ключевые слова:** ультразвуковой неразрушающий контроль, электромагнитно-акустический преобразователь, намагничивающее устройство, моделирование

---

**Адрес для переписки:**

Стрижак В.А.  
Ижевский государственный технический университет,  
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069,  
Республика Удмуртия, Россия  
e-mail: str@istu.ru

---

**Address for correspondence:**

Strizhak V.A.  
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,  
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069,  
Udmurt Republic, Russia  
e-mail: str@istu.ru

---

**Для цитирования:**

В.А. Стрижак, А.В. Пряхин.  
Оптимизация параметров намагничивающего устройства электромагнитно-акустического преобразователя для контроля легированных сталей.  
Приборы и методы измерений.  
2023. – Т. 14, № 2. – С. 81–95.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-81-95

---

**For citation:**

V.A. Strizhak, A.V. Pryakhin.  
[Optimization of the Parameters of the Magnetizing Device of the Electromagnetic-Acoustic Transducer].  
Devices and Methods of Measurements.  
2023, vol. 14, no. 2, pp. 81–95 (in Russian).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-81-95

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-81-95

# Optimization of the Parameters of the Magnetizing Device of the Electromagnetic-Acoustic Transducer

V.A. Strizhak, A.V. Pryakhin

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

Received 04.03.2023

Accepted for publication 14.06.2023

## Abstract

Contactless electromagnetic-acoustic transducers have a set of significant advantages over contact transducers, but at the same time they have significant disadvantages that require the development of effective magnetizing devices. Compared to magnetizing devices that are using permanent magnets, electric current magnetization devices are easily removed from the object of testing and cleaned from contamination by metal particles. Unfortunately, such transducers have significant dimensions and weight.

A transducer containing a magnetic circuit magnetized by an electric current coil and two independent electromagnetic inductors located in the gap between the central part of the magnetic circuit and the object of testing has been developed. Inductors are two flat coils, each of them has form like a butterfly. The inductor conductors located in the working area have mutually perpendicular directions; they allow exciting and receiving the transversely polarized acoustic waves without rearranging the transducer. In order to reduce the overall dimensions and mass of the transducer, the mass and dimensional parameters of the magnetizing device were optimized for operating conditions when the magnetization of the object of testing and measurement are performed during the active measurement phase. During the passive measurement phase, which is three times longer than the active phase in time, the magnetizing device cools down. The cyclic mode with alternating active and passive phases made it possible to reduce the weight of the transducer by more than 3 times. In the working area of the transducer with a size of 15×15 mm, with a gap of 1 mm between the magnetic field concentrator and the object of testing, a field with a normal component of 2.4 T is created.

The transducer has protection of the magnetization device from overheating, and the cyclic mode of operation allows for continuous performance of up to 30 measurements per minute at an ambient temperature of 20 °C.

The developed magnetizing device can be used in solving a number of problems of structuroscopy, thickness measurement, flaw detection by electromagnetic-acoustic methods based on accurate measurement of the propagation time of elastic waves in the object of testing.

**Keywords:** ultrasonic nondestructive testing, electromagnetic acoustic transducer, magnetizing system, modeling

---

### Адрес для переписки:

Стрижак В.А.  
Ижевский государственный технический университет,  
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069,  
Республика Удмуртия, Россия  
e-mail: str@istu.ru

---

### Address for correspondence:

Strizhak V.A.  
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,  
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069,  
Udmurt Republic, Russia  
e-mail: str@istu.ru

---

### Для цитирования:

В.А. Стрижак, А.В. Пряхин.  
Оптимизация параметров намагничивающего устройства электромагнитно-акустического преобразователя для контроля легированных сталей.  
Приборы и методы измерений.  
2023. – Т. 14, № 2. – С. 81–95.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-81-95

---

### For citation:

V.A. Strizhak, A.V. Pryakhin.  
[Optimization of the Parameters of the Magnetizing Device of the Electromagnetic-Acoustic Transducer].  
Devices and Methods of Measurements.  
2023, vol. 14, no. 2, pp. 81–95 (in Russian).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-81-95



## Введение

Электромагнитно-акустические (ЭМА) преобразователи применяются для решения широкого круга задач толщинометрии, структуроскопии и дефектоскопии [1–7]. Использование бесконтактных ЭМА преобразователей обусловлено рядом существенных эксплуатационных достоинств, в частности: возможностью контроля через воздушный зазор без применения контактных жидкостей; работой в условиях высоких температур; отсутствием износа ЭМА преобразователей; независимостью результатов контроля от перекосов преобразователей относительно поверхности объекта контроля и от наличия на поверхности ржавчины, окалины, краски, загрязнений; возможностью возбуждения и приёма нескольких частот упругих колебаний и разных типов волн, в том числе поперечных с горизонтальной поляризацией, которые трудно возбудить и принять контактным способом. К недостаткам ЭМА преобразователей необходимо отнести низкий коэффициент преобразования при излучении акустической волны и низкую чувствительность при приёме, а также значительные размеры, обусловленные необходимостью применения мощных намагничивающих устройств. Для увеличения эффективности ЭМА преобразователей на излучение и приём производят оптимизацию магнитных цепей и акустических полей, создаваемых преобразователем в объекте контроля [8–18]. Выделение полезного сигнала на фоне шумов реализуется за счёт усреднения большой серии измерений и разработкой специальных алгоритмов выделения полезной информации [19, 20].

Работа ЭМА преобразователя основана на преобразовании энергии электромагнитных колебаний в энергию упругих колебаний при излучении в объект контроля и преобразовании упругих колебаний в электромагнитные колебания при приёме.

При возбуждении и приёме ультразвуковых импульсов преимущественно используют магнитострикционный и электродинамический механизмы ЭМА преобразования. Магнитострикционный механизм основан на изменении размеров тела под действием магнитного поля, а электродинамический механизм использует

силу Лоренца, действующую на проводник с током в магнитном поле. Магнитострикционный механизм, как правило, требует создания тангенциальных магнитных полей в поверхностном слое объекта контроля и чаще всего используется для листовых материалов. Для массивных деталей наиболее предпочтительным является электро-динамический механизм ЭМА преобразования в виду относительно легко реализуемого нормального (ортогонального к поверхности объекта контроля) магнитного поля. При электродинамическом механизме повышение эффективности ЭМА преобразователей возможно за счёт повышения амплитуды возбуждающего импульса в индукторе, повышения чувствительности приёмного тракта и увеличения поля постоянного намагничивания в зоне возбуждения акустических импульсов [21–26].

Одной из важных задач структуроскопии является определение напряжённо-деформированного состояния крупных металлических объектов [27, 28]. Например, в ободьях железнодорожных вагонных колёс, производимых в соответствии с требованиями ГОСТ 10791-89 и ТУ 0943-157-01124328-2003, формируются остаточные напряжения, являющиеся следствием механических и физико-химических процессов при изготовлении (осадке, формовке, прокатке обода и последующей термической обработке). В процессе эксплуатации циклические нагрузки в области взаимодействия колеса и рельса создают чрезвычайно высокие давления, что при значительных внутренних остаточных напряжениях может приводить к появлению и быстрому развитию усталостных трещин даже при отсутствии явных металлургических дефектов. В связи с этим, нормативные документы РД 32-144-2000, СТО РЖД 1.11.002-2008, Европейский стандарт EN 13262-2004 предусматривают инструментальный контроль остаточных механических напряжений в ободьях цельнокатаных колёс при их производстве и эксплуатации.

В соответствии с нормативными документами для цельнокатаных вагонных колёс диаметром 957 мм максимальное значение остаточных напряжений вблизи круга катания должно быть отрицательным (сжимающим) и не должно превышать значения 190 МПа

в окружном направлении на глубине 10 мм от поверхности катания колеса. При превышении указанной величины колесо не допускается к эксплуатации. Слой, на котором сжимающие напряжения переходят в растягивающие (переход через ноль), должен находиться на глубине не менее 40 мм от поверхности катания колеса. Последовательность проведения измерений и схема расположения ЭМА преобразователей по окружности и по толщине обода колеса предполагает установку датчика в 4-х точках на одно сечение обода при точности позиционирования по радиусу  $\pm 1$  мм. Локальность датчика обеспечивается конечным размером рабочей части индуктора. При толщине обода колеса около 74 мм размер рабочей зоны индуктора не должен превышать 15 мм [28–30].

Цель работы: оптимизировать массогабаритные параметры ЭМА преобразователя для целей контроля обода железнодорожного колеса.

## Принцип работы электромагнитного акустического преобразователя

Измерение напряжённо-деформированного состояния производится по разности времени прихода двух акустических импульсов, имеющих разную поляризацию. При этом первый индуктор ориентирован так, чтобы колебания в волне были параллельны с вектором механических напряжений, а второй индуктор ориентирован перпендикулярно вектору механических напряжений. Рисунок 2 иллюстрирует механизм возбуждения поперечной волны индуктором с током  $i$ , расположенным в магнитном поле  $B$ . В объекте контроля индуцируются ток  $i_B$ , который под действием приложенного поля  $B$  вызывает смещение частиц в поверхностном слое. Смещения в объекте контроля, в соответствии с рисунком, направлены параллельно оси  $X$ . Для изменения поляризации волны необходимо повернуть индуктор с током на  $90^\circ$  вокруг оси  $Z$ . В этом случае смещения в объекте контроля будут направлены параллельно оси  $Y$ .

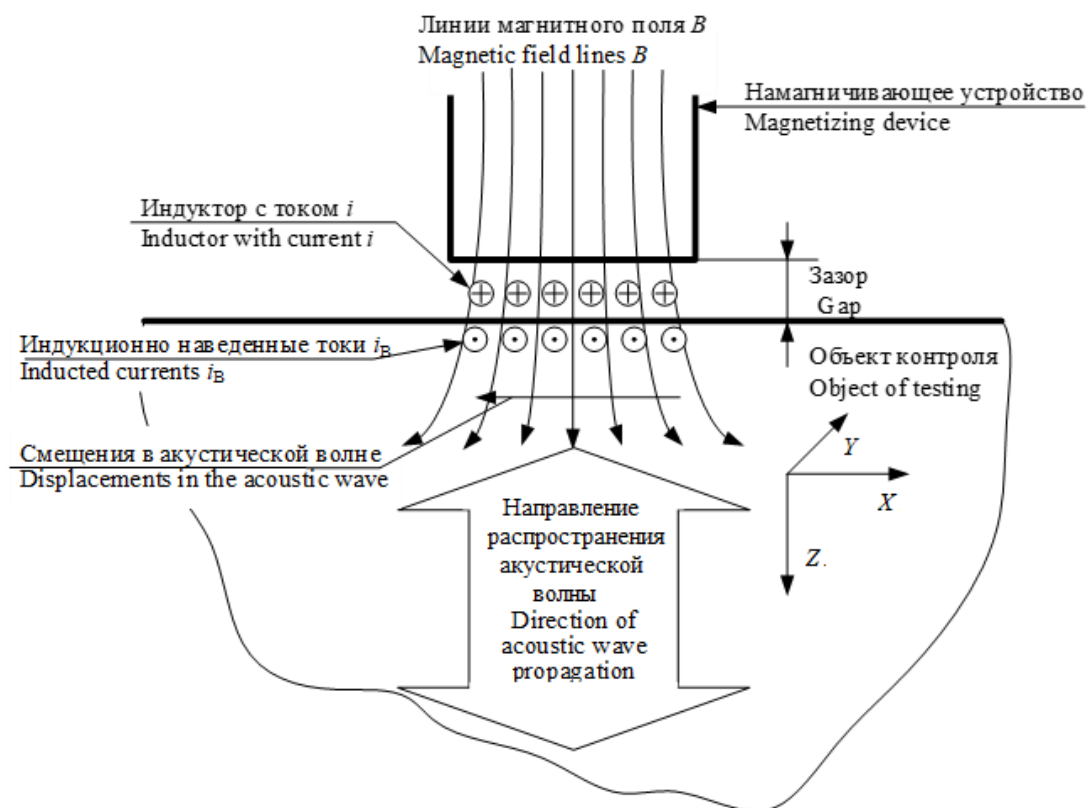


Рисунок 1 – Возбуждение и приём акустической волны ЭМА преобразователем

Figure 1 – Excitation and reception of an acoustic wave by an EMAT transducer

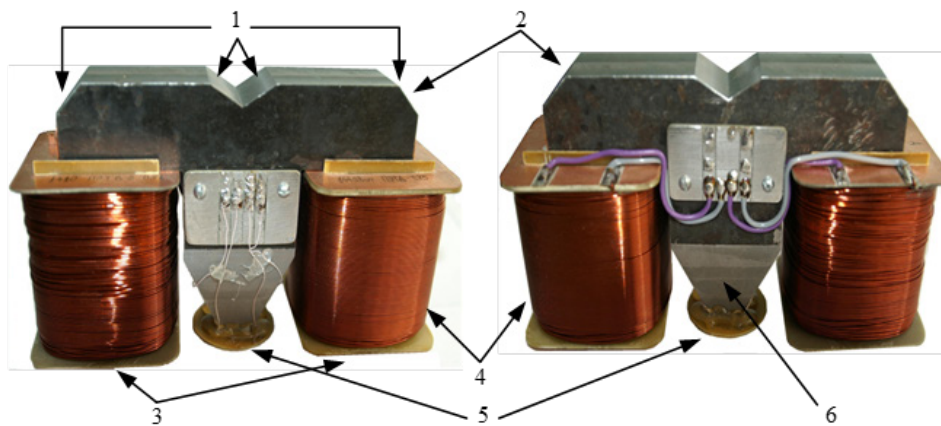
Аналогичным образом реализуется приём акустических импульсов. Смещения в поверхностном слое образца в зоне с магнитным полем  $B$  создают токи под индуктором  $i_B$ .

Увеличение амплитуды сигнала ЭМА преобразователя возможно как при увеличении величины поля в зазоре по нормали к поверхности объекта контроля, так и при помощи увеличения амплитуды зондирующего импульса в катушке возбуждения. Наличие двух перпендикулярных друг другу индукторов позволяют создавать две поперечных волны с разной поляризацией.

### Намагничивающее устройство

Известны конструкции намагничивающего устройства, основанные на использовании постоянных магнитов и электромагнитов, в том числе работающих в импульсном режиме [31, 33]. Недостатком устройства намагничивания на постоянных магнитах является необходимость приложения дополнительного усилия при установке и снятии преобразователя

с объекта контроля и трудности с очисткой рабочей поверхности преобразователя от загрязнения металлическими частицами. Преобразователь, содержащий устройство намагничивания током, лишен перечисленных недостатков. При выборе конструкции устройства намагничивания учтено, что приёмно-излучающие ЭМА индукторы, установленные в зазоре между объектом контроля и элементами магнитопровода, не должны подвергаться механическому воздействию. Например, устройство намагничивания в виде П-образной конструкции предполагает наличие двух опорных элементов, и индукторы ЭМА преобразователя расположены под рабочей опорой. Непосредственный контакт индуктора с объектом контроля будет приводить к быстрому разрушению индуктора. Конструкция магнитопровода, содержащая два опорных элемента по краям и концентратор магнитного поля в его центральной части (Ш-образная конструкция), лишены этого недостатка. Такая конструкция обеспечивает нормированный зазор в зоне индуктора, что повышает ресурс преобразователя.



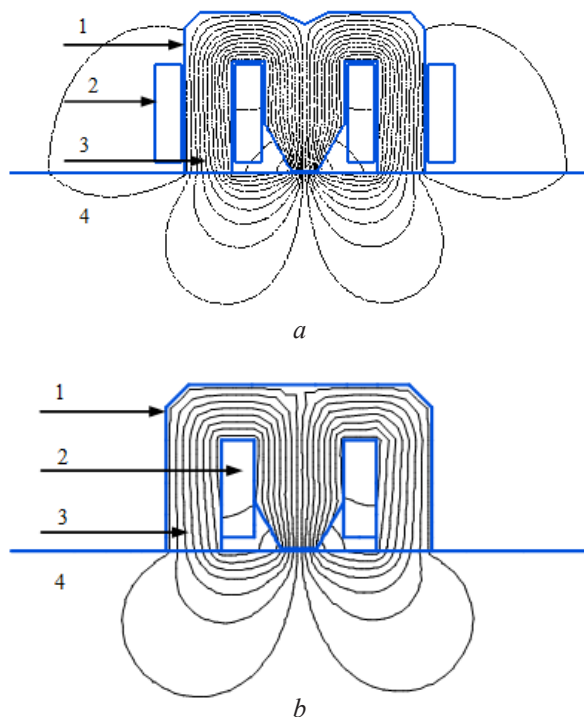
**Рисунок 2** – Преобразователь с намагничивающими обмотками: 1 – акустические отражатели; 2 – магнитопровод; 3 – опорные элементы магнитопровода; 4 – катушка намагничивания; 5 – индуктор

**Figure 2** – Transducer with magnetizing windings: 1 – acoustic reflectors; 2 – magnetic conductor; 3 – supporting elements of the magnetic conductor; 4 – magnetizing coil; 5 – inductor

Для решения поставленной задачи контроля разработано намагничивающее устройство на базе электромагнита с учётом регламентированного размера рабочей зоны для индуктора в виде квадрата со стороной 15 мм (рисунок 2). Изготовленный преобразователь содержит устройство намагничивания, представляющее собой Ш-образный магнитопровод

с двумя катушками, размещёнными на его опорных элементах. Магнитные поля, создаваемые в катушках намагничивания, направлены так, чтобы получить в рабочей зоне максимальную величину намагничивающего поля. Суммарное поле нормальной компоненты в рабочей зоне установки индуктора при зазоре в 1 мм достигает 2,4 Тл, что соответствует

области полей технического насыщения предполагаемого материала объекта контроля (например, Сталь 65 Г). Для исключения влияния паразитных акустических сигналов, возбуждаемых индуктором в теле магнитопровода, на тыльной стороне магнитопровода (напротив зоны расположения индуктора) нанесены отражающие грани, не влияющие на создаваемое в магнитопроводе поле. Количественные характеристики магнитного поля в зависимости от места размещения катушек намагничивания, размера и формы магнитопровода получены в программном комплексе для моделирования двумерных краевых задач методом конечных элементов Elcut 5.1. Измеренное поле в зазоре между концентратором магнитного поля и объектом контроля получено близким к расчётному значению. Недостатком экспериментального образца являлась большая масса (около 4,7 кг) и значительные габаритные размеры (185×100×65 мм).



**Рисунок 3** – Расположение намагничивающих обмоток: *a* – обмотка на опорных элементах; *b* – обмотка на центральном элементе магнитопровода; 1 – магнитопровод; 2 – намагничивающая обмотка; 3 – силовые линии поля; 4 – объект контроля

**Figure 3** – Magnetizing winding arrangements: *a* – winding on the support elements; *b* – winding on the central element of the magnetic circuit; 1 – magnetic core; 2 – magnetizing winding; 3 – field lines; 4 – tested object

Для оценки влияния расположения намагничивающих обмоток на характеристики преобразователя произведено моделирование двух вариантов устройства, где магнитопровод выполнен из стали Ст20, а объект контроля задан в виде бесконечного полупространства из стали Ст3. Моделирование проводилось без изменения размеров магнитопровода и величины зазора. На рисунке 3 показано распределение линий магнитного поля в устройстве намагничивания с обмотками, установленными на опорных элементах магнитопровода (рисунок 3а), и с обмоткой, расположенной на центральном элементе магнитопровода (рисунок 3б). Наличие зазора в рабочей зоне магнитопровода и массивность объекта контроля вызывает перераспределение полей, приводящее к увеличению полей рассеивания вокруг опорных элементов магнитопровода и ослаблению величины поля в рабочей зоне (рисунок 3а). Размещение обмотки вокруг концентратора магнитного поля магнитопровода (рисунок 3б) позволяет уменьшить общую массу устройства на 15 % и уменьшить длину устройства с учётом обмоток на 30 мм.

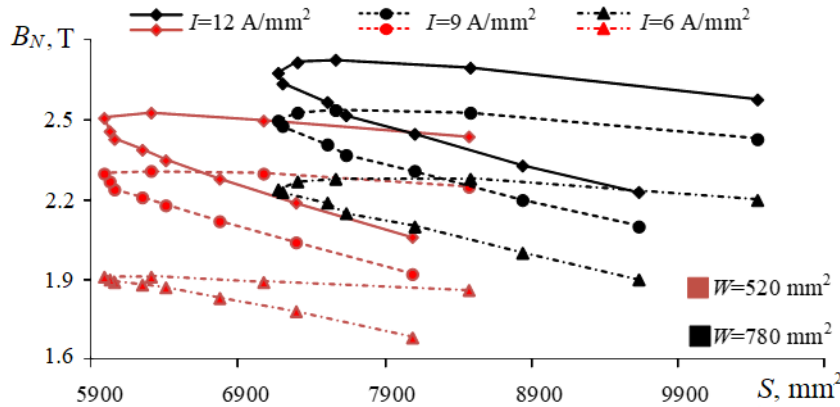
Существенное уменьшение объёма намагничивающего устройства можно реализовать за счёт использования такого режима, при котором намагничивающее поле включается только на время проведения измерений (активная фаза измерения), а в остальное время магнитное поле выключено (пассивная фаза измерения). Проведение измерений с чередованием пассивной и активной фазы (циклический режим) позволяет увеличить плотность тока намагничивания  $I$  в обмотке. При этом в активной фазе измерения существенно возрастет выделяемое количество тепла, которое будет рассеиваться в пассивном режиме. Результаты моделирования устройства намагничивания при различных плотностях тока  $I$  в обмотке приведены на рисунках (рисунки 4, 5).

Моделирование проводилось путём изменения геометрических пропорций магнитопровода с фиксированной площадью окна намотки и толщине магнитопровода в 29 мм. Расчёт произведён для площади окна намотки  $W = 520 \text{ мм}^2$  и  $W = 780 \text{ мм}^2$ . Обмотка выполнена проводом толщиной 0,49 мм, установлена на концентраторе магнитопровода и содержит соответственно 1500 или 2250 витков. В связи с прямой зависимостью общей массы



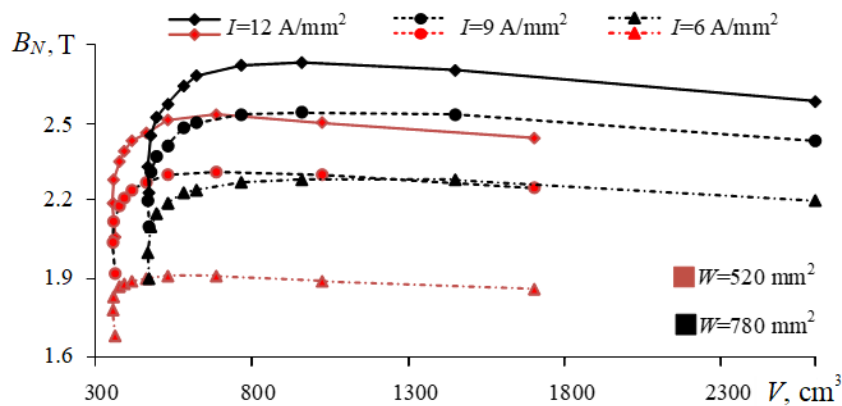
преобразователя от площади фронтальной поверхности результата расчёта поля в зазоре приведён относительно площади фронтальной поверхности магнитопровода  $S$  (рисунок 4) и

его объёма  $V$  (рисунок 5). При оценке объёма  $V$  намагничивающего устройства учитывается размер катушки намагничивания и её вынос за периметр магнитопровода.



**Рисунок 4** – Поле  $B_N$  в зазоре рабочей зоны при разной площади фронтальной поверхности магнитопровода  $S$  и различных токах намагничивания  $I$

**Figure 4** – Dependencies of magnetic field in gap  $B_N$  on the frontal area of magnetic core  $S$  for different magnetization modes



**Рисунок 5** – Поле  $B_N$  в зазоре рабочей зоны при разных объёмах  $V$  и различных токах намагничивания  $I$

**Figure 5** – Field in gap  $B_N$  in dependence of magnetic core volume  $V$  in different magnetization modes

На рисунке 4 приведены зависимости величины поля  $B_N$  в зазоре рабочей зоны от площади фронтальной поверхности  $S$ . На зависимости величины поля  $B_N$  от объёма магнитопровода  $V$  можно выделить верхний горизонтальный и нижний вертикальный участок для каждого значения тока намагничивания  $I$ . Горизонтальный участок зависимости сформирован при увеличении длины магнитопровода, вертикальный участок зависимости получен при увеличении высоты магнитопровода. У слишком низкого магнитопровода или у слишком высокого магнитопровода снижение величины поля  $B_N$

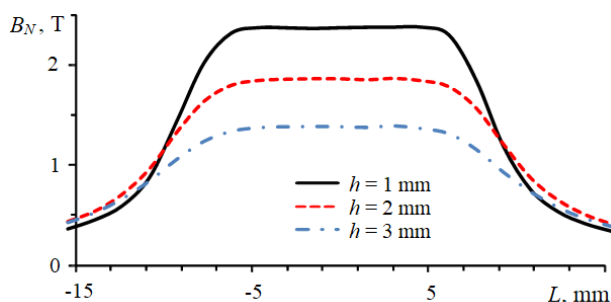
в зазоре рабочей зоны вызвано увеличением длины магнитной цепи. Так как в магнитную цепь также входит участок объекта контроля, представленный в расчёте бесконечным полупространством, то в силу существенного проигрыша сечения магнитопровода по сравнению с массивным объектом контроля, увеличение высоты магнитопровода приводит к более существенному увеличению магнитного сопротивления и, как следствие, падению величины поля  $B_N$ .

Для каждого тока намагничивания  $I$  в зависимости от площади фронтальной поверхности магнитопровода  $S$  наблюдается

экстремум, соответствующий минимальной фронтальной площади. Зона экстремума является оптимальной с точки зрения минимального размера магнитпровода при незначительном падении величины  $B_N$  относительно её максимального значения. Использование протяжённого магнитпровода упирается в резкий рост его объёма из-за всё более плоской катушки намагничивания (рисунок 5).

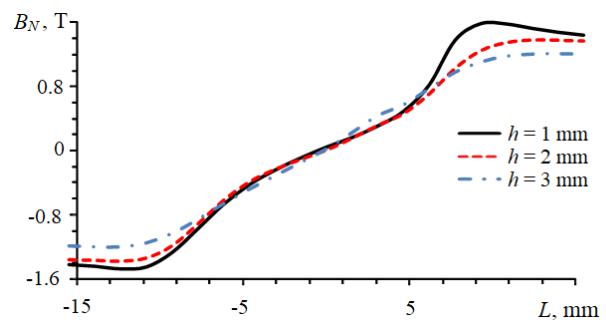
Увеличение площади окна намагничивающей обмотки с  $W = 520 \text{ мм}^2$  до  $W = 780 \text{ мм}^2$  приводит к росту  $B_n$  на 8,7 % и 6,8 % при плотности тока  $I = 9 \text{ А/мм}^2$  и  $12 \text{ А/мм}^2$  соответственно. При этом происходит рост площади  $S$  фронтальной поверхности магнитпровода на 20 % и объёма на 17 %. Использование больших размеров окон намагничивающей обмотки или рост плотности тока существенно ухудшает эксплуатационные свойства преобразователя в виду значительного роста подводимой мощности.

На основании результатов оптимизации размеров магнитпровода разработан и изготовлен преобразователь, предназначенный для циклического режима работы с чередованием активной и пассивной фаз измерения (пассивная фаза измерения по времени в три раза превышает активную фазу). Вес преобразователя составил 1,47 кг, при габаритных размерах  $110 \times 55 \times 70 \text{ мм}$ . Распределение магнитного поля в зазоре под концентратором электромагнита при различных величинах тока намагничивания показано на рисунках 6 и 7. Результаты получены с использованием магнитометра МФ-23ИМ.



**Рисунок 6** – Распределение нормальной составляющей магнитного поля  $B_N$  по продольной координате  $L$  электромагнита при различных размерах зазора  $h$

**Figure 6** – Distribution of the normal component of the magnetic field  $B_N$  along the longitudinal coordinate  $L$  of the electromagnet at different gap dimensions  $h$



**Рисунок 7** – Распределение тангенциальной составляющей магнитного поля  $B_T$  по продольной координате  $L$  электромагнита при различных размерах зазора  $h$

**Figure 7** – Distribution of the tangential component of the magnetic field  $B_T$  along the longitudinal coordinate  $L$  of the electromagnet at different gap dimensions  $h$

Максимальное значение нормальной составляющей намагничивающего поля при зазоре в 1 мм составляет 2,4 Тл. Форма распределения магнитного поля не зависит от величины зазора, максимальная величина нормальной составляющей магнитного поля при росте величины зазора на 1 мм теряет 0,5 Тл. Расчётная рабочая зона электромагнита 15 мм, в основном, лежит в области равномерного распределения нормальной составляющей поля. Тангенциальная составляющая магнитного поля на краях рабочей зоны не превышает по модулю 0,8 Тл.

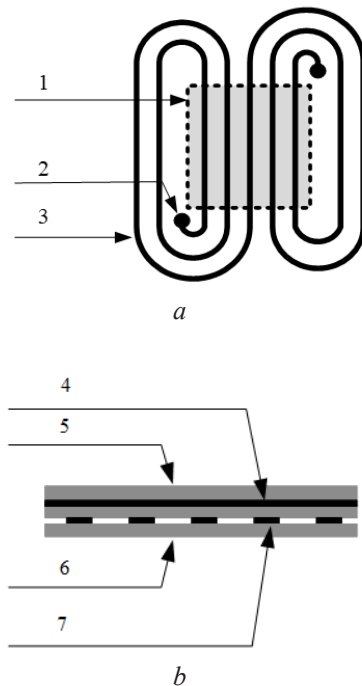
### Приёмно-излучающая система преобразователя

Основные требования, выдвигаемые к приёмно-излучающей системе преобразователя – эффективность на излучение и чувствительность на приём. Дополнительное требование – технологичность изготовления. Область использования методики (измерение временных интервалов) требует от преобразователя излучения и приёма коротких импульсов с ярко выраженными фронтами (широкополосных импульсов).

В целях исключения необходимости перестановки преобразователя во время измерений, в преобразователе используются два независимых индуктора, имеющие взаимно перпендикулярные направления, работающие в совмещенном режиме. Это позволяет через электронную схему устройства переключаться между направлениями поляризации акустичес-



ких волн и отображать их в соответствующем измерительном канале. Размер зоны индуктора определяется заданной локальностью преобразователя. Индуктор реализован набором проводников с однонаправленным током, расположенных в рабочей зоне в виде «бабочки» (рисунок 8а). Размер рабочей зоны индуктора составляет квадрат со стороной 15 мм. Центральная частота возбуждающих импульсов 2,5 МГц.



**Рисунок 8** – Индуктор: *a* – топология индуктора «бабочка»; *b* – индуктор в разрезе; 1 – рабочей зона; 2 – контакт; 3 – проводники; 4 – проводник с током 1; 5 – изолятор; 6 – протектор; 7 – проводник с током 2

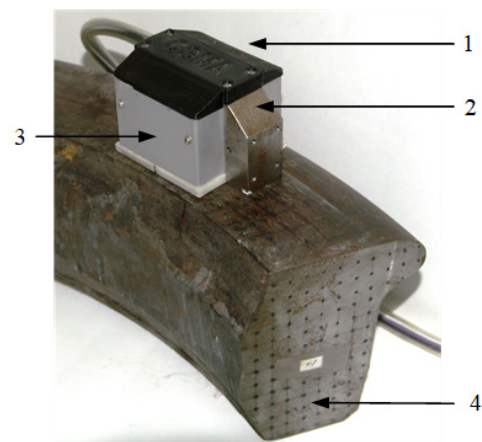
**Figure 8** – An inductor: *a* – butterfly inductor topology; *b* – sectional view of an inductor; 1 – working area; 2 – contact; 3 – conductors; 4 – conductor with current 1; 5 – insulator; 6 – protector; 7 – conductor with current 2

Требования к индуктору, работающему на излучение: низкое реактивное сопротивление и устойчивость к значительным импульсным токам (более 50 А). Требования к индуктору, работающему на приём: согласованность с трактом усиления и устойчивость к значительным импульсным напряжениям (более 1000 В). Выбор количества витков индуктора излучения определяется возможностями электронной аппаратуры. На частоте 2,5 МГц современное состояние электронной базы позволяет получить ударные импульсы разма-

хом до 2,5 кВ. Условия диэлектрической прочности индуктора на межвитковый пробой и условия согласования с электронным трактом генератора позволили достичь в импульсе значения 700 Ампер-витков. При этом индуктор хорошо согласуется с приёмным трактом, реактивное сопротивление индуктора на частоте 2,5 МГц составило около 60 Ом при индуктивности 4 мкГн.

В собранном виде два индуктора с набором изоляционных слоёв выглядят, как слоёная конструкция, содержащая протектор для защиты индуктора со стороны объекта контроля, 1-й индуктор, изолятор, 2-й индуктор, изолятор индуктора от магнитопровода (рисунок 8б). Индукторы изготовлены из двустороннего фольгированного стеклотекстолита СФ2-0,3-35Г фоторезистивным способом. Трассировка выполнена в форме «бабочки», число витков каждой плоской катушки равно 20, расстояние проводник – зазор 0,4–0,3 мм. Разные фрагменты конструкции склеены между собой и имеют общую толщину в 1 мм.

Внешний вид преобразователя представлен на рисунке 9.



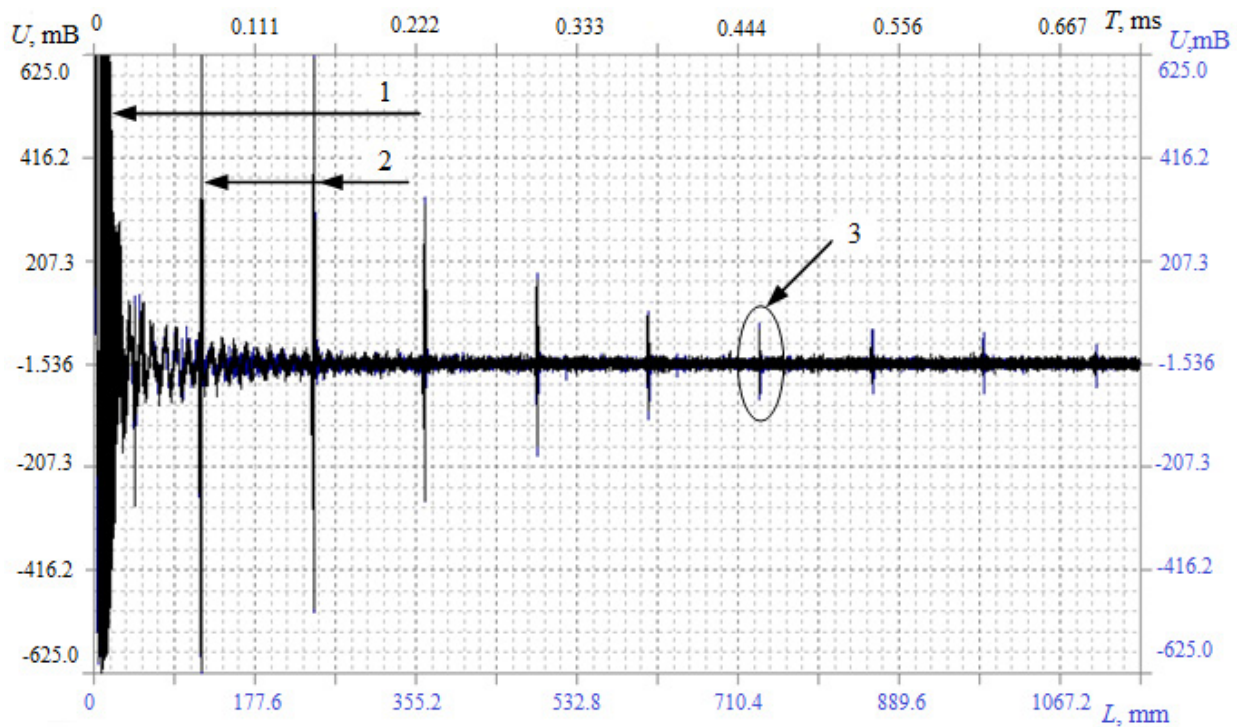
**Рисунок 9** – Преобразователь в собранном виде установлен на фрагменте обода колеса: 1 – крышка с индикаторами режима работы; 2 – магнитопровод с акустическим отражателем и отверстиями для установки преобразователя в узел перемещения; 3 – катушка намагничивания в защитном кожухе; 4 – фрагмент обода железнодорожного колеса

**Figure 9** – Fully assembled transducer mounted on a piece of wheel rim: 1 – cover with operating mode indicators; 2 – magnetic conductor with acoustic reflector and holes for installing the converter in the displacement unit; 3 – magnetization coil in a protective casing; 4 – fragment of the rim of a railway wheel

В верхней части преобразователя, под крышкой, расположена схема электронной защиты от перегрева с индикатором наличия тока намагничивания и индикатором включения защиты. На внешних торцах магнитопровода размещены отверстия для установки преобразователя в узлы перемещения или позиционирования.

Схема защиты настроена на превышение отметки 60 °С, после чего цепь тока намагничивания принудительно размыкается, что предотвращает возникновение перегрева. Эксплуатация преобразователя реализована на структуроскопе электромагнитно-акустическом СЭМА (номер в госреестре утверждённых типов средств измерений – 61957-15), с использованием программного обеспечения «Принц VIII» (свидетельство о государственной регистрации программы

для ЭВМ – RU 2015662211). Программное обеспечение реализует процедуру измерения с усреднением в пакетном и непрерывном режиме [34]. Внешний вид интерфейса программы и вид зарегистрированного сигнала показан на рисунке 10. По нажатию кнопки «Старт» производится включение устройства намагничивания и после паузы в 0,4 с результаты измерений последовательно накапливаются для каждого индуктора. Пауза необходима для завершения процесса установления магнитной цепи. После окончания измерений поле отключается. Для отстройки от шумов использовано усреднение многократных измерений, типовая настройка – 64. Полный цикл измерений с учётом усреднения составляет 0,5 с с последующим интервалом охлаждения за 1,5 с, и используется для установки преобразователя в новое положение.

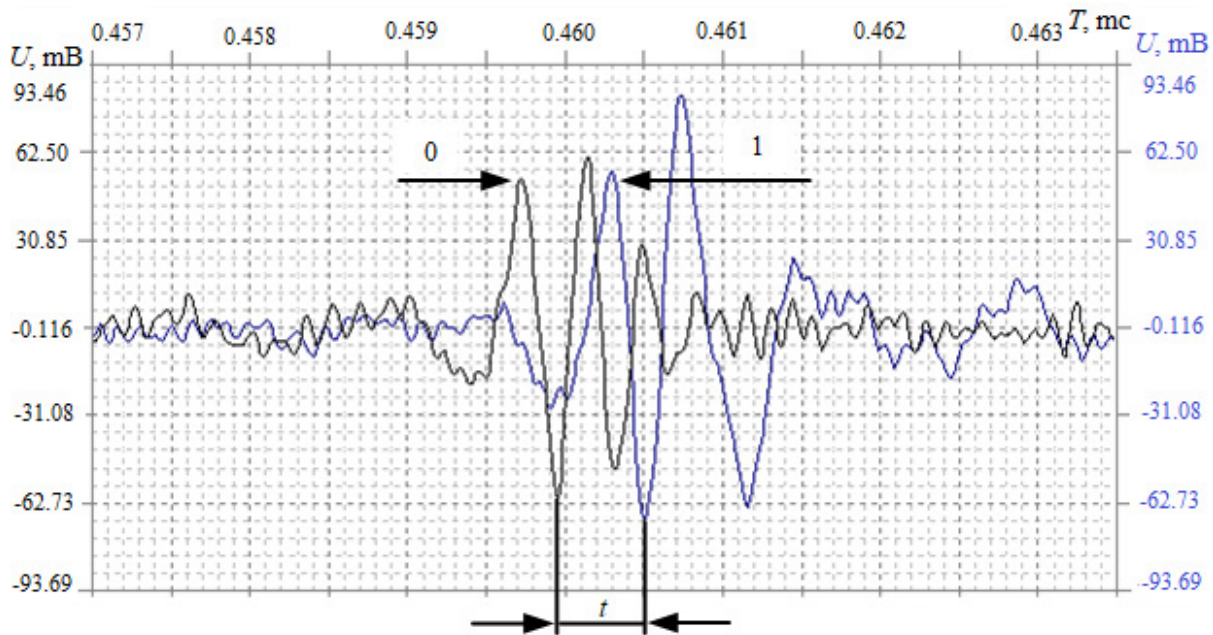


**Рисунок 10** – Вид зарегистрированного сигнала в программе «Принц VIII»: 1 – зондирующий импульс; 2 – 1-й и 2-й донный импульс в ограничении; 3 – 6-й донный импульс

**Figure 10** – A view of signals registered in the Prince VIII software: 1 – probing pulse; 2 – 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> bottom pulses in limitation; 3 – 6<sup>th</sup> bottom pulse

В рабочем поле программы «Принц VIII» (рисунок 10) представлена эхограмма многократных отражений, полученная при прозвучивании обода толщиной 0,13 м поперечными волнами с взаимно-перпендикуляр-

ной поляризацией. На верхней шкале отображается время, а на нижней – расстояние, пройденное акустическим импульсом с учётом введённой в программу скорости ультразвука.



**Рисунок 11** – Вид сигналов на 6-м отражении: 0 – Звено 0; 1 – Звено 1

**Figure 11** – A view of signals with magnification at 6<sup>th</sup> reflection: 0 – Link 0; 1 – Link 1

Подробный вид зарегистрированных сигналов в зоне 6-го отражения показан на рисунке 11. Разность времени прихода между импульсами  $t$  позволяет рассчитать величину напряжённо деформированного состояния объекта контроля в зоне установки датчика [30]. Частота дискретизации измерительного канала составляет 100 МГц. Для точного расчёта временного интервала  $t$  производится интерполяция промежуточных точек с целью повышения частоты дискретизации до 1 ГГц. Значение временного интервала  $t$  получено поиском максимума функции взаимной корреляции импульса в звене 0 и импульса в звене 1 [35].

## Заключение

Разработан преобразователь с электрическим намагничиванием, содержащий 2 независимых ЭМА индуктора в виде бабочки, эффективно излучающих и принимающих акустические импульсы двух поперечных волн с взаимно перпендикулярной поляризацией. Индукторы расположены в зазоре между центральной частью магнитопровода и объектом контроля и позволяют без перестановки преобразователя возбуждать и регистрировать в объекте контроля поперечно поляризованные

акустические импульсы. С целью уменьшения габаритных размеров и массы преобразователя произведена оптимизация устройства намагничивания для условий эксплуатации с чередованием активной и пассивной фаз измерения, где пассивная фаза по времени в три раза превышает активную фазу. Это позволило уменьшить вес преобразователя в более чем 3 раза, значительно уменьшив его габаритные размеры. В рабочей зоне преобразователя размером 15×15 мм при зазоре в 1 мм между концентратором магнитного поля и объектом контроля создаётся нормальное поле в 2,4 Тл. Преобразователь содержит защиту устройства намагничивания от перегрева, а циклический режим работы позволяет обеспечить непрерывную производительность до 30 измерений в минуту при температуре окружающей среды 20 °С. Нагрев преобразователя происходит только во время проведения измерений. В момент переустановки преобразователя устройство намагничивания остывает.

Разработанное намагничивающее устройство может быть использовано при решении ряда задач структуроскопии, толщинометрии, дефектоскопии ЭМА методами, основанными на точном измерении времени распространения упругих волн в объекте контроля.



## Благодарности

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252/>

## Acknowledgments

This work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252/>

## Список использованных источников

1. Hirao M., Ogi H. Electromagnetic Acoustic Transducers: Noncontacting Ultrasonic Measurements Using EMATs. Tokyo: Springer Japan. – 2017. – 380 p.

**DOI:** 10.1007/978-4-431-56036-4

2. Lü J., Liu G. Magneto-Acousto-Electrical NDT and Improved EMD De-Noising Algorithm. Transactions of Chinese Electrotechnical Society. – 2018. – Vol. 33. – No. 17. – Pp. 3935–3942.

**DOI:** 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.171126

3. Pei C., Zhao S., Liu T., Chen Z. A new method for plastic strain measurement with Rayleigh wave polarization. Ultrasonics. – 2018. – Vol. 88. – Pp. 168–173.

**DOI:** 10.1016/j.ultras.2018.04.004

4. Xie S., Tian M., Xiao P., Pei C., Chen Z., Takagi T. A hybrid nondestructive testing method of pulsed eddy current testing and electromagnetic acoustic transducer techniques for simultaneous surface and volumetric defects inspection. NDT & E International. – 2017. – Vol. 86. – Pp. 153–163. **DOI:** 10.1016/j.ndteint.2016.12.006

5. Баширов М.Г. Электромагнитно-акустический метод оценки технического состояния энергетического оборудования / М.Г. Баширов [и др.] // Промышленная энергетика. – 2016. – № 12. – С. 8–13.

6. Муравьев В.В. Прибор для исследований акустоупругих характеристик тонких проволок / В.В. Муравьев, Д.В. Злобин, А.В. Платунов // Изв. высш. уч. заведений. Приборостроение. – 2017. – Т. 60. – № 6. – С. 572–577.

**DOI:** 10.17586/0021-3454-2017-60-6-572-577

7. Козлов А.В. Области применения и основные типы преобразователей с сухим точечным контактом в ультразвуковом контроле / А.В. Козлов // Контроль. Диагностика. – 2018. – № 10. – С. 4–18.

**DOI:** 10.14489/td.2018.10.pp.004-018

8. Муравьев В.В. Влияние анизотропии механических свойств тонколистового стального проката на информативные параметры волн Лэмба / В.В. Муравьев, О.В. Муравьева, Л.В. Волкова // Сталь. – 2016. – № 10. – С. 75–79.

9. Isla J., Cegla F. EMAT phased array: A feasibility study of surface crack detection. Ultrasonics. – 2017. –

Vol. 78. – Pp. 1–9.

**DOI:** 10.1016/j.ultras.2017.02.009

10. Muraveva O.V., Muravev V.V., Myshkin Yu.V. Laws of formation of grating lobes in the acoustic field of electromagnetic-acoustic transducers as a linear array of unidirectional conductors. NDT & E International. – 2018. – Vol. 93. – Pp. 40–56.

**DOI:** 10.1016/j.ndteint.2017.09.009

11. Plesnetsov S.Yu. [et al.] Simulation of electromagnetic-acoustic conversion process under torsion waves excitation. Part 2. Technical Electrodynamics. – 2018. – No 1. – Pp. 30–36. **DOI:** 10.15407/technd.2018.01.030

12. Ren W., He J., Dixon S., Xu K. Enhancement of EMAT's efficiency by using silicon steel laminations back-plate. Sensors and Actuators A: Physical. 2018. – Vol. 274. – Pp. 189–198. **DOI:** 10.1016/j.sna.2018.03.010

13. Rieger K., Erni D., Rueter D. Noncontact reception of ultrasound from soft magnetic mild steel with zero applied bias field EMATs. NDT & E International. – 2022. – Vol. 125. – Pp. 102569.

**DOI:** 10.1016/j.ndteint.2021.102569

14. Базылев Д.Н. Ультразвуковой контроль металлоконструкций с использованием фазированной электромагнитно-акустической антенной решетки / Д.Н. Базылев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2018. – Т. 61. – № 12. – С. 1060–1066. **DOI:** 10.17586/0021-3454-2018-61-12-1060-1066

15. Комаров В.А. Магнитоупругое электромагнитно-акустическое преобразование. Часть 7. Двойное преобразование при эффекте Видемана / В.А. Комаров // Контроль. Диагностика. – 2020. – Т. 23. – № 10(268). – С. 30–39.

**DOI:** 10.14489/td.2020.10.pp.030-039

16. Толипов Х.Б. Возможности повышения эффективности бесконтактного излучателя акустических волн / Х.Б. Толипов // Дефектоскопия. 2017. – № 4. – С. 71–74.

17. Ашихин Д.С. Исследование влияния параметров электромагнитно-акустического преобразователя на точность измерения толщины изделий / Д.С. Ашихин, А.В. Федоров // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2022. – Т. 22. – № 2. – С. 376–384.

**DOI:** 10.17586/2226-1494-2022-22-2-376-384

18. Петров К.В. Моделирование магнитных, электрических и акустических полей проходного преобразователя для контроля цилиндрических объектов / К.В. Петров // Дефектоскопия. – 2019. – № 2. – С. 16–24. **DOI:** 10.1134/S0130308219020027

19. Петров К.В. Влияние конструктивных особенностей проходного электромагнитно-акустического преобразователя на результаты контроля цилиндрических объектов / К.В. Петров, М.Ю. Соков, О.В. Муравьева // Вестник ИжГТУ

имени М.Т. Калашникова. – 2018. – Т. 21. – № 2. – С. 135–146. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-135-146

20. Алешин Н.П. Исследование выявляемости поверхностных объемных дефектов при ультразвуковом контроле с применением волн Рэлея, генерируемых электромагнитно-акустическим преобразователем / Н.П. Алешин [и др.] // Дефектоскопия. – 2021. – № 5. – С. 22–30.

DOI: 10.31857/S0130308221050031

21. Гобов Ю.Л. Намагничивающая система для ЭМА-сканера-дефектоскопа / Ю.Л. Гобов, А.В. Михайлов, Я.Г. Смородинский // Дефектоскопия. – 2014. – № 11. – С. 48–56.

22. Сучков Г.М. Портативный накладной прямой совмещенный электромагнитно-акустический преобразователь для ультразвукового контроля через диэлектрические слои толщиной до 20 мм на поверхности ферромагнитных металлоизделий / Г.М. Сучков, Р.П. Мигущенко, О.Ю. Кропачек // Дефектоскопия. – 2022. – № 5. – С. 13–23.

DOI: 10.31857/S0130308222050025

23. Сучков Г.М. Бесконтактный спектральный экспресс-способ обнаружения коррозионных повреждений металлоизделий / Г.М. Сучков [и др.] // Дефектоскопия. – 2020. – № 1. – С. 14–21.

DOI: 10.31857/S0130308220010029

24. Сучков Г.М. Мощные источники питания высокочастотных преобразователей электромагнитного типа для измерений, контроля и диагностики / Г.М. Сучков, Р.П. Мигущенко, С.Ю. Плещенцов // Дефектоскопия. – 2017. – № 12. – С. 35–39.

25. Сучков Г.М. Генератор зондирующих импульсов для ЭМА-дефектоскопов / Г.М. Сучков [и др.] // Дефектоскопия. – 2012. – № 9. – С. 42–47.

26. Чабанов В.Е. Расчет и проектирование электромагнитно-акустических преобразователей для ультразвукового неразрушающего контроля / В.Е. Чабанов, В.А. Жуков // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2014. – № 3(201). – С. 57–73.

27. Муравьев В.В. Электромагнитно-акустический метод исследования напряженно-деформированного состояния рельсов / В.В. Муравьев [и др.] // Дефектоскопия. – 2016. – № 7. – С. 12–20.

28. Муравьев В.В. Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов при изготовлении / В.В. Муравьев, К.А. Тапков // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8. – № 3. – С. 263–270. DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-263-270

29. Муравьев В.В. Оценка остаточных напряжений в ободьях вагонных колес электромагнитно-

акустическим методом / В.В. Муравьев [и др.] // Дефектоскопия. – 2011. – № 8. – С. 16–28.

30. Муравьев В.В. Исследование двухосного напряженного состояния в рельсах Р65 методом акустоупругости / В.В. Муравьев [и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. – 2019. – Т. 17. – № 1. – С. 19–25.

DOI: 10.22213/2410-9304-2019-1-19-25

31. Муравьев В.В. К расчету параметров системы намагничивания электромагнитно-акустического преобразователя / В.В. Муравьев, В.А. Стрижак, Е.Н. Балобанов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1(17). – С. 197–205.

32. Самокрутов А.А. Моделирование магнитных систем ЭМАП для возбуждения ультразвуковых волн в упругом слое в постоянном и импульсном магнитных полях / А.А. Самокрутов // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 12. – С. 22–27.

DOI: 10.14489/td.2014.12.pp.022-027

33. Злобин Д.В. Влияние динамического подмагничивания на эффективность электромагнитно-акустического преобразования при волноводном контроле прутков / Д.В. Злобин, Л.В. Волкова // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8. – № 3. – С. 236–245.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-236-245

34. Стрижак В.А. Информационно-измерительная система возбуждения, приема, регистрации и обработки сигналов электромагнитно-акустических преобразователей / В.А. Стрижак [и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1(17). – С. 243–250.

35. Стрижак В.А. Аппаратно-программный комплекс контроля прутков зеркально-теневым методом на многократных отражениях / В.А. Стрижак [и др.] // Изв. высш. уч. заведений. Приборостроение. – 2017. – Т. 60. – № 6. – С. 565–571.

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-6-565-571

## References

1. Hirao M., Ogi H. Electromagnetic Acoustic Transducers: Noncontacting Ultrasonic Measurements Using EMATs. Tokyo: Springer Japan, 2017, 380 p.

DOI: 10.1007/978-4-431-56036-4

2. Lü J., Liu G. Magneto-Acousto-Electrical NDT and Improved EMD De-Noising Algorithm. *Transactions of Chinese Electrotechnical Society*, 2018, vol. 33, no. 17, pp. 3935–3942. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.171126

3. Pei C., Zhao S., Liu T., Chen Z. A new method for plastic strain measurement with Rayleigh wave polarization. *Ultrasonics*, 2018, vol. 88, pp. 168–173.

DOI: 10.1016/j.ultras.2018.04.004



4. Xie S., Tian M., Xiao P., Pei C., Chen Z., Takagi T. A hybrid nondestructive testing method of pulsed eddy current testing and electromagnetic acoustic transducer techniques for simultaneous surface and volumetric defects inspection. *NDT & E International*, 2017, vol. 86, pp. 153–163. **DOI:** 10.1016/j.ndteint.2016.12.006
5. Bashirov M.G., Khusnutdinova I.G., Khusnutdinova L.G., Usmanov D.R. Electromagnetic-acoustic method of technical state assessment of power equipment. *Industrial Energy*, 2016, no. 12, pp. 8–13.
6. Muraviev V.V., Zlobin D.V., Platunov A.V. Device for studies on acoustic-elastic characteristics of thin wires. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, vol. 60, no. 6, pp. 572–577.  
**DOI:** 10.17586/0021-3454-2017-60-6-572-577
7. Kozlov A.V., Pichugin N.K., Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G. Fields of application and principle types of transducers with dry point contact in ultrasonic non-destructive testing. *Kontrol'. Diagnostika*, 2018, no. 10, pp. 4–18. **DOI:** 10.14489/td.2018.10.pp.004-018
8. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Volkova L.V. Influence of the mechanical anisotropy of thin steel sheets on the parameters of Lamb waves. *Steel in Translation*, 2016, vol. 46, no. 10, pp. 752–756.  
**DOI:** 10.3103/S0967091216100077
9. Isla J., Cegla F. EMAT phased array: A feasibility study of surface crack detection. *Ultrasonics*, 2017, vol. 78, pp. 1–9. **DOI:** 10.1016/j.ultras.2017.02.009
10. Muraveva O.V., Muravev V.V., Myshkin Yu.V. Laws of formation of grating lobes in the acoustic field of electromagnetic-acoustic transducers as a linear array of unidirectional conductors. *NDT & E International*, 2018, vol. 93, pp. 40–56. **DOI:** 10.1016/j.ndteint.2017.09.009
11. Plesnetsov S.Yu., Petrishchev O.N., Mygushchenko R.P., Suchkov G.M. Simulation of electromagnetic-acoustic conversion process under torsion waves excitation. Part 2. *Technical Electrodynamics*, 2018, no. 1, pp. 30–36. **DOI:** 10.15407/techned2018.01.030
12. Ren W., He J., Dixon S., Xu K. Enhancement of EMAT's efficiency by using silicon steel laminations back-plate. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, vol. 274, pp. 189–198. **DOI:** 10.1016/j.sna.2018.03.010
13. Rieger K., Erni D., Rueter D. Noncontact reception of ultrasound from soft magnetic mild steel with zero applied bias field EMATs. *NDT & E International*, 2022, vol. 125, pp. 102569. **DOI:** 10.1016/j.ndteint.2021.102569
14. Bazylev D.N., Romanovich V.A., Somov S.N., Pyrkin A.A. Ultrasonic inspection of metal structures using phased electromagnetic-acoustic antenna array. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, vol. 61, no. 12, pp. 1060–1066.  
**DOI:** 10.17586/0021-3454-2018-61-12-1060-1066
15. Komarov V.A. Magneto-elastic electromagnetic-acoustic conversion. Part 7. Double conversion with Wideman effect. *Kontrol'. Diagnostika*, 2020, vol. 23, no. 10(268), pp. 30–39.  
**DOI:** 10.14489/td.2020.10.pp.030-039
16. Tolipov K.B. Possibilities for increasing the efficiency of contactless emitters of acoustic waves. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 304–307. **DOI:** 10.1134/S106183091704009X
17. Ashikhin D.S., Fedorov A.V. Influence investigation of electromagnetic-acoustic transducer parameters on thickness measurement accuracy by numerical modeling methods. *Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 376–384.  
**DOI:** 10.17586/2226-1494-2022-22-2-376-384
18. Petrov K.V., Murav'eva O.V., Myshkin Y.V., Basharova A.F. Modeling magnetic, electric, and acoustic fields of a pass-through transducer when testing cylindrical objects. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2019, vol. 55, no. 2, pp. 102–110.  
**DOI:** 10.1134/S1061830919020062
19. Petrov K.V., Sokov M.Y., Muravieva O.V. The Effect of Electromagnetic Acoustic Transducer Design Features on Results of Cylinder Object Testing. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2018, vol. 21, no. 2, pp. 135–146.  
**DOI:** 10.22213/2413-1172-2018-2-135-146
20. Aleshin N.P., Krysko N.V., Kusyy A.G., Skrynnykov S.V., Mogilner L.Y. Investigating the detectability of surface volumetric defects in ultrasonic testing with the use of rayleigh waves generated by an electromagnetic-acoustic transducer. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2021, vol. 57, no. 5, pp. 361–368.  
**DOI:** 10.1134/S1061830921050028
21. Gobov Y.L., Mikhailov A.V., Smorodinskii Y.G. A magnetizing system for an ema scanner-flaw detector. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, vol. 50, no. 11, pp. 659–666. **DOI:** 10.1134/S1061830914110035
22. Suchkov G.M., Mygushchenko R.P., Kropachek O.Yu. A portable straight beam combined electromagnetic-acoustic transducer for ultrasonic testing through dielectric layers up to 20 mm thick on the surface of ferromagnetic metal products. *Defectoscopy*, 2022, no. 5, pp. 13–23. **DOI:** 10.31857/S0130308222050025
23. Suchkov G.M., Migushchenko R.P., Kropachek O.Y., Plesnetsov S.Y., Bilyk Z.V., Boussi S., Horoshailo Y.E., Efimenko S.A. Noncontact spectral express method for detecting corrosion damage to metal products. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2020, vol. 56, no. 1, pp. 12–19. **DOI:** 10.1134/S1061830920010118
24. Suchkov G.M., Mygushchenko R.P., Plesnetsov S.Y. Powerful sources for high frequency electromagnetic transducers for measurement, monitoring and diagnostics. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017, vol. 53, no. 12, pp. 850–855. **DOI:** 10.1134/S1061830917120063

25. Suchkov G.M., Petrishchev O.N., Cherednichenko I.V., Fedorov V.V., Desyatnichenko A.V., Khashchina S.V., Maslova M.S. A generator of probing pulses for ema flaw detectors. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2012, vol. 48, no. 9, pp. 537–540.

**DOI:** 10.1134/S1061830912090082

26. Chabanov V.E., Zhukov V.A. Calculation and design of emat for ultra-sonic nondestructive testing. *ST. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and mathematics*, 2014, no. 3(201), pp. 57–73.

27. Murav'ev V.V., Volkova L.V., Platunov A.V., Kulikov V.A. An electromagnetic-acoustic method for studying stress-strain states of rails. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, vol. 52, no. 7, pp. 370–376.

28. Murav'ev V.V., Tapkov K.A. Evaluation of strain-stress state of the rails in the production. *Devices and methods of measurements*, 2017, vol. 8, no. 3, pp. 263–270.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-3-263-270

29. Muravyev V.V., Muravyeva O.V., Strizhak V.A., Pryakhin A.V., Balobanov E.N., Volkova L.V. Evaluation of residual stresses in rims of wagon wheels using the electromagnetic-acoustic method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2011, vol. 47, no. 8, pp. 512–521.

**DOI:** 10.1134/S1061830911080079

30. Murav'ev V.V., Yakimov A.V., Volkova L.V., Platunov A.V. Investigation of biaxial stress state in R65 rails by acoustoelasticity method. *Intellekt. Sist. Proizv.*,

2019, vol. 17, no. 1, pp. 19–25.

**DOI:** 10.22213/2410-9304-2019-1-19-25

31. Muraviev V.V., Strizhak V.A., Balobanov E.N. On Parameters Calculation of Electromagnetic-Acoustic Transducer Magnetic System. *Intellekt. Sist. Proizv.*, 2011, vol. 6, no. 1, pp. 197–205.

32. Samokrutov A.A., Alyokhin S.G., Shevaldykin V.G., Bobrov V.T., Bobrov S.V. Simulation of magnetic field for emat ultrasonic waves in an elastic layer in a continuous and pulsed magnetic fields. *Kontrol'. Diagnostika*, 2014, no. 12, pp. 22–27.

**DOI:** 10.14489/td.2014.12.pp.022-027

33. Zlobin D.V., Volkova L.V. Influence of dynamic magnetization to improve the efficiency of electromagnetic-acoustic transformation with waveguide control rods. *Devices and Methods of Measurements*, 2017, vol. 8, no. 3, pp. 236–245.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-3-236-245

34. Strizhak V.A., Pryakhin A.V., Obukhov S.A., Efremov A.B. The information and measuring system for excitation, detection, registration and processing of signals from electromagnetic-acoustic transducers. *Intellekt. Sist. Proizv.*, 2011, vol. 6, no. 1, pp. 243–250.

35. Strizhak V.A., Pryakhin A.V., Khasanov R.R., Efremov A.B. Hardware-software complex for rods control by mirror-shadow method using multiple reflections. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, vol. 60, no. 6, pp. 565–571. **DOI:** 10.17586/0021-3454-2017-60-6-565-571

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-96-105

# The Use of Fresnel Lenses in LED Sources of Local Illumination to Optimize the Distribution of Illumination of the Working Plane

P.S. Bogdan, E.G. Zaytseva, I.A. Kovalenok, T.D. Tarasenko, E.V. Duboysky

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

Received 27.02.2023

Accepted for publication 25.05.2023

## Abstract

For widely used LED sources there is a sharp decrease in the illumination of the working plane from the center to the edge. The purpose of this study was to analyze the effectiveness of Fresnel lenses usage as a fairly simple and technological element to increase the uniformity of illumination created by LED lamps of local lighting.

A method has been developed for calculating of the distribution of illumination created by the combination of “LED matrix – Fresnel lens” when the distance between the lens and the matrix is less than the focal length of the lens. Comparison of the calculation results and experiments for the case when the lens is located at a distance of 50 cm from the working plane indicates the correctness of the developed calculation method. This made it possible to use this technique to solve the problem of improved uniformity of illumination distribution in the working plane of local lighting LED sources.

It was found that the change in the distance between the matrix and the lens in the range of 0.5–1.5 cm affects the maximum illumination and its uniformity to a lesser extent than the change in focal lengths in the range of 10–100 cm. Analytical dependences of the uniformity of the working surface illumination as a function of the Fresnel lens focal length and its distance to the LED matrix were obtained for three cases. In the first case one lens is used for the entire matrix while the axes of symmetry of the light intensity curves of LEDs are parallel to the axis of the lens. In the second case one lens is also used for the entire matrix, but the continuations of the axes of symmetry of the light intensity curves pass through the front focus of the lens. In the third one an individual Fresnel lens is used for each LED. It is established that for all three cases dependencies have almost the same character. Therefore, the choice of using one of these three options may be due to manufacturability, cost-effectiveness, thermal stability, and other considerations.

Calculations using the above-mentioned analytical dependences made it possible to determine values of the parameters of the “LED matrix – Fresnel lens” system at which the indicators of illumination and uniformity meet the standards’ requirements.

**Keywords:** mathematical modeling, LED matrix, Fresnel lens, RGB LED, illumination distribution

---

## Адрес для переписки:

Зайцева Е.Г.  
Белорусский национальный технический университет,  
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь  
e-mail: egzaytseva@bntu.by

---

## Address for correspondence:

Zaytseva E. G.  
Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus  
e-mail: egzaytseva@bntu.by

---

## Для цитирования:

P.S. Bogdan, E.G. Zaytseva, I.A. Kovalenok,  
T.D. Tarasenko, E.V. Duboysky.  
The Use of Fresnel Lenses in LED Sources of Local Illumination  
to Optimize the Distribution of Illumination of the Working Plane.  
Приборы и методы измерений.  
2023. – Т. 14, № 2. – С. 96–105.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-96-105

---

## For citation:

P.S. Bogdan, E.G. Zaytseva, I.A. Kovalenok, T.D. Tarasenko,  
E.V. Duboysky.  
The Use of Fresnel Lenses in LED Sources of Local Illumination  
to Optimize the Distribution of Illumination of the Working Plane.  
Devices and Methods of Measurements.  
2023, vol. 14, no. 2, pp. 96–105.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-96-105

---

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-96-105

## Использование линзы Френеля в светодиодных источниках локального освещения для оптимизации распределения освещённости рабочей плоскости

П.С. Богдан, Е.Г. Зайцева, И.А. Ковалёнок, Т.Д. Тарасенко, Е.В. Дубойский

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

Поступила 27.02.2023

Принята к печати 25.05.2023

Для широко используемых светодиодных источников света имеет место резкий спад освещённости рабочей плоскости от центра к краю. Целью настоящего исследования являлся анализ эффективности применения линз Френеля как достаточно простого и технологичного элемента для увеличения равномерности освещённости, создаваемой светодиодными светильниками локального освещения.

Разработана методика расчёта распределения освещённости, создаваемой комбинацией «светодиодная матрица – линза Френеля», когда расстояние между линзой и матрицей меньше фокусного расстояния линзы. Сравнение результатов расчёта и экспериментов для случая, когда линза располагается на расстоянии 50 см от рабочей плоскости, свидетельствует о корректности разработанной методики расчёта. Это позволило использовать данную методику для решения задачи повышения равномерности освещённости рабочей плоскости в светодиодных источниках локального освещения.

Установлено, что изменение расстояния между матрицей и линзой в диапазоне 0,5–1,5 см влияют на максимальную освещённость и её равномерность в меньшей степени, чем изменение фокусных расстояний в пределах 10–100 см. Получены аналитические зависимости равномерности освещённости рабочей поверхности как функции фокусного расстояния линзы Френеля и её расстояния до светодиодной матрицы для трёх случаев. В первом случае используется одна линза для всей матрицы, при этом оси симметрии кривых силы света светодиодов параллельны оси линзы. Во втором случае также используется одна линза для всей матрицы, но продолжения осей симметрии кривых силы света проходят через передний фокус линзы. В третьем – для каждого светодиода используется индивидуальная линза Френеля. Установлено, что для всех трёх случаев зависимости имеют практически одинаковый характер. Поэтому выбор использования одного из трёх вариантов может быть обусловлен технологичностью, экономичностью и термической устойчивостью и др.

Расчёты с использованием выше упомянутых аналитических зависимостей позволили определить значения параметров системы «светодиодная матрица – линза Френеля», при которых показатели освещённости и равномерности соответствуют требованиям стандартов.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, светодиодная матрица, линза Френеля, RGB светодиод, распределение освещённости

---

**Адрес для переписки:**

Зайцева Е.Г.

Белорусский национальный технический университет,  
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь  
e-mail: egzaytseva@bntu.by

---

**Address for correspondence:**

Zaytseva E.G.

Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus  
e-mail: egzaytseva@bntu.by

---

**Для цитирования:**

P.S. Bogdan, E.G. Zaytseva, I.A. Kovalenok,  
T.D. Tarasenko, E.V. Duboysky.

The Use of Fresnel Lenses in LED Sources of Local Illumination  
to Optimize the Distribution of Illumination of the Working Plane.

Приборы и методы измерений.

2023. – Т. 14, № 2. – С. 96–105.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-96-105

---

**For citation:**

P.S. Bogdan, E.G. Zaytseva, I.A. Kovalenok, T.D. Tarasenko,  
E.V. Duboysky.

The Use of Fresnel Lenses in LED Sources of Local Illumination  
to Optimize the Distribution of Illumination of the Working Plane.

Devices and Methods of Measurements.

2023, vol. 14, no. 2, pp. 96–105.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-96-105



## Introduction

Currently LED sources are widely used for indoor lighting of premises. Their advantages include high energy efficiency and durability. In addition, ability to adjust the power parameters of LED arrays and to introduce LEDs with different spectral characteristics into their composition allows you to vary the brightness and spectral composition of light. Space inside the luminous intensity curve (the distribution of luminous intensity obtained by the cross section of the photometric body of the illuminating device by a characteristic plane or surface and represented in the form of a light beam graph<sup>1</sup>) is limited by a small solid angle [1, 2]. Therefore, there is a sharp decline in the illumination of the working plane from the center to the edge [3] which is not consistent with the requirements of the standard<sup>2</sup> for lighting parameters.

To expand this spatial angle and consequently the uniformity of illumination of the working surface additional optics are used (an optical system in the form of a lens and/or a reflector designed to create the necessary light intensity curve) [4–10] and diffusers [11, 12]. The latter have two versions: with the use of diffusants [11] or with an additional microprismatic surface [12].

These technical solutions have a different level of complexity and provide a different degree of uniformity of illumination of the working plane. The purpose of this study was to analyze the effectiveness of the use of Fresnel lenses in LED lamps of local lighting as a fairly simple and technological element to increase the uniformity of illumination of the working plane within the limits regulated by the standard<sup>2</sup>.

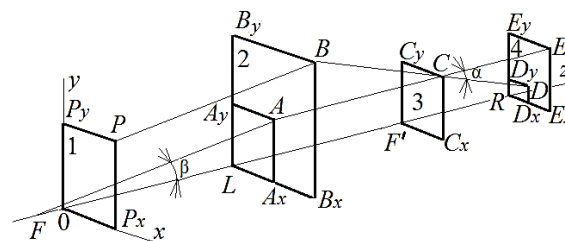
## Mathematical modeling of the distribution of illumination created by the combination of “LED matrix – Fresnel lens”

The scheme for calculating the distribution of illumination contains 2 elements: an LED matrix 1

<sup>1</sup> GOST 34819-2021. Lighting devices. Lighting requirements and test methods. Access mode: <http://nt-led74.ru/media/uploads/2022/07/06/gost-34819-2021.pdf?ysclid=lgdc0fq1h4478346242>. – Access date: 25.04.2023 (in Russian)

<sup>2</sup> GOST R 55710-2013. Lighting of workplaces inside buildings. Norms and measurement methods. Access mode: [https://ecolight.ru/sadm\\_files/Documents/2940421\\_GOST\\_R\\_55710-2013.pdf](https://ecolight.ru/sadm_files/Documents/2940421_GOST_R_55710-2013.pdf). – Access date 26.01.2022 (in Russian)

and a Fresnel lens 2 (Figure 1). Parallel to them are the rear focal plane 3 of the lens and the working plane 4. The planes of the LED matrix 1, lens 2 and working plane 4 are parallel, and the distance between the LED matrix 1 and lens 2 is less than the focal length of the lens.



**Figure 1** – Scheme of the beam path from the LED through the lens to the working plane: 1 – the plane of the LED matrix; 2 – the plane of the Fresnel lens; 3 – the rear focal plane of the Fresnel lens; 4 – the working plane

From the LED belonging to the matrix 1 and located at point  $P$  with coordinates  $P_x, P_y$ , the beam hits the Fresnel lens 2 at point  $B$  with coordinates  $B_x, B_y$ . There its refraction occurs. Then, crossing the rear focal plane 3 of the lens at point  $C$  with coordinates  $C_x, C_y$ , the beam comes to the working plane 4 at point  $D$  with coordinates  $D_x, D_y$ . To determine the direction of the beam  $PB$  after refraction by lens 2 allows the trajectory of the additional beam passing through points  $F, A, C, E$ . This ray is parallel to the  $PB$  ray up to the intersection with the lens plane 2 and comes from the front focus of the lens  $F$ . After refraction in the plane of the lens 2 at point  $A$  with coordinates  $A_x$  and  $A_y$ , this ray becomes parallel to the optical axis of the lens  $FF'$ , crossing the rear focal plane 2 at point  $C$  with coordinates  $C_x, C_y$ , and the working plane 3 at point  $E$  with coordinates  $E_x, E_y$ . Since the rays  $PB$  and  $FA$  are parallel before refraction by lens 2, after refraction they intersect at one point  $C$  belonging to the rear focal plane.

In accordance with the Methodological Manual<sup>3</sup> on the design of artificial lighting of public and residential buildings, the illumination  $E_D$  at the point  $D$

<sup>3</sup> Design of artificial lighting of public and residential buildings. Methodical manual // Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation. Federal Center for Standardization, Standardization and Conformity Assessment in Construction. – M., 2016, 141 p. Access mode: [https://www.faufcc.ru/upload/methodical\\_materials/mp15.pdf](https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp15.pdf). – Date of access: 28.01.2022 (in Russian)

on the working plane 4 is proportional to two values. Firstly, it is the light intensity  $I$  in the direction of the angle  $\beta$  between the beam direction  $PB$  and the axis of symmetry of the light intensity curve parallel to the optical axis of the lens 2. Secondly, it is the cosine of the angle  $\alpha$  between the beam  $CD$  incident on the working plane 4 and the perpendicular  $CE$  to the working plane 4. In addition, the illumination of  $ED$  is inversely proportional to the square of the sums of the distances  $l_{PB}$  and  $l_{BD}$  between the radiation source  $P$  and the illuminated point  $D$ , which are the sum of the segments  $PB$  and  $BD$ :

$$E_D = \frac{I(\beta) \cos \alpha}{(l_{PB} + l_{BD})^2}. \quad (1)$$

Taking into account the geometric relations in Figure 1, the formula for calculating the illumination  $E_{i,j}(x,y)$  created by an LED with the number  $i$  horizontally and  $j$  vertically at point  $D$  with  $x, y$  coordinates on the working plane 4 has the form:

$$E_{i,j}(x,y) = \frac{I(\beta) \cos \alpha}{(l_1 + l_2)^2}, \quad (2)$$

where  $\beta$  is the angle of inclination of the light beam to the axis of symmetry of the light intensity curve parallel to the axis  $FF'$  of the Fresnel lens 2, and simultaneously to the axis of symmetry of the Fresnel lens;  $I(\beta)$  is the dependence of the light intensity on the angle  $\beta$ ;  $\alpha$  is the angle of inclination of the beam after refraction by the Fresnel lens 2 perpendicular to the illuminated plane 4;  $l_1$  is the travel length of the light beam from the LED with the number  $(i,j)$  on the matrix 1 to the Fresnel lens 2;  $l_2$  is the travel length of the refracted beam from the Fresnel lens 2 to the working plane 4.

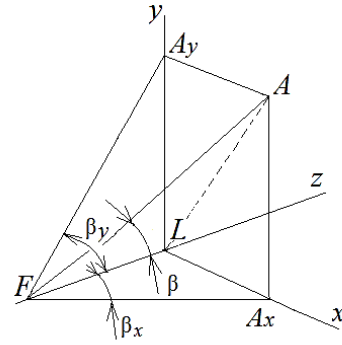
Since the orientation of the segments  $PB$  and  $BD$  of the light beam is considered in the three-dimensional space  $xyz$ , when calculating the illumination, the values of the quantities in the right part of formula (1) are determined through their projections on the  $xOz$  and  $yOz$  planes.

The angle  $\beta$  is related to its projections  $\beta_x$  and  $\beta_y$  on the  $xOz$  and  $yOz$  planes by the ratio (Figure 2):

$$\beta = \arctan \sqrt{\tan^2 \beta_x + \tan^2 \beta_y}. \quad (3)$$

Similarly, the angle  $\alpha$  is determined by its projections  $\alpha_x$  and  $\alpha_y$  on the  $xOz$  and  $yOz$  planes:

$$\alpha = \arctan \sqrt{\tan^2 \alpha_x + \tan^2 \alpha_y}.$$



**Figure 2** – Scheme for establishing relations between angle  $\beta$  and its projections  $\beta_x$  and  $\beta_y$  on the  $xOz$  and  $yOz$  planes

The tangents of the projections  $\beta_x$  and  $\beta_y$ ,  $\alpha_x$  and  $\alpha_y$ , angles  $\beta$  and  $\alpha$ , in turn, are functions of the coordinates  $x_P, y_P, x_D, y_D$  of the points  $P$  and  $D$  in Figure 1 and the parameters  $d, f, g$ :

$$\begin{aligned} \tan \beta_x &= \frac{(d-f)x_P + x_D f}{f(g+d) - dg}; \\ \tan \beta_y &= \frac{(d-f)y_P + y_D f}{f(g+d) - dg}; \\ \tan \alpha_x &= \frac{(f-g) \tan \beta_x + x_P}{f}; \\ \tan \alpha_y &= \frac{(f-g) \tan \beta_y + y_P}{f}, \end{aligned}$$

where  $d$  is the distance  $LR$  between the Fresnel lens 2 and the working plane 4 in Figure 1;  $f$  is the focal length of the Fresnel lens 2, equal to  $FL$  and  $LF'$  in Figure 1;  $g$  is the distance  $OL$  between the LED matrix 1 and the Fresnel lens 2 in Figure 1.

Segments  $l_1$  and  $l_2$  are connected with their projections  $l_{1x}, l_{1y}$  and  $l_{2x}, l_{2y}$  expressions:

$$l_1 = \sqrt{l_{1x}^2 + l_{1y}^2}; \quad l_2 = \sqrt{l_{2x}^2 + l_{2y}^2},$$

where  $l_{1x}$  is the projection of the segment  $PB$  of the light beam from the LED  $P$  to the Fresnel lens 2 on the  $xOz$  plane;  $l_{1y}$  is the projection of the segment  $PB$  of the light beam from the LED  $P$  to the Fresnel lens 2 on the  $yOz$  plane;  $l_{2x}$  is the projection of the segment  $BD$  of the refracted beam from the Fresnel lens 2 to the working plane 4 on the  $xOz$  plane;  $l_{2y}$  is the projection of the segment  $BD$  of the refracted beam from the Fresnel lens 2 to the working plane 4 on the  $yOz$  plane; and

$$l_{1x} = \frac{d}{\cos \beta_x}; \quad l_{1y} = \frac{d}{\cos \beta_y};$$

$$l_{2x} = \frac{d}{\cos \alpha_x}; \quad l_{2y} = \frac{d}{\cos \alpha_y}.$$

At each point of the working plane 4 (Figure 1) with  $x, y$  coordinates, there is a summation of the energy flows that have come to this point along the directions of the light rays from all LEDs at different angles of incidence and with different angles of deviation from the axis of symmetry of the light intensity curve. The values of these angles depend on the location and, consequently, on the number of the LED in the matrix. The total distribution of illumination  $E(x, y)$  generated by all LEDs of the matrix 1 at the point of the working plane 4 with  $x, y$  coordinates can be calculated by the formula:

$$E(x, y) = \sum_{i=-n}^{i=n} \sum_{j=-m}^{j=m} E_{i,j}(x, y), \quad (4)$$

where  $i$  is the number of the LED in the matrix on the  $x$  axis;  $j$  is the number of the LED in the matrix on the  $y$  axis;  $n$  is the number of the first and last LED in the matrix at the beginning of the reference from the middle LED on the  $x$  axis;  $m$  is the number of the first and last LED in the matrix at the beginning of the reference from the middle LED on the  $y$  axis;  $E_{i,j}(x, y)$  is the illumination distribution created by an LED having the number  $i$  horizontally and the number  $j$  vertically, calculated by the formula (2).

Expression (4) is used for the case when one common Fresnel lens is used for all LEDs. Another option is also possible, when an individual Fresnel lens is used for each LED. In this case, the optical axis of this individual lens coincides with the central axis of the LED. In this case, it is necessary to first calculate the illumination distribution created by the “LED – individual Fresnel lens” system. Then all these illumination distributions are summed up taking into account the displacement of each LED – lens pair relative to the zero coordinate on the working surface. Then the sum of the illumination distribution is described by formula (5):

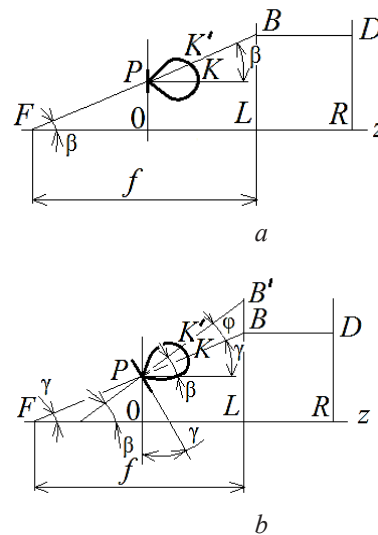
$$E(x, y) = \sum_{i=-n}^{i=n} \sum_{j=-m}^{j=m} E_0(x - i\Delta_x, y - i\Delta_y), \quad (5)$$

where  $E_0(x, y)$  is the distribution of illumination created on the working surface by one pair of “LED – lens” having a zero coordinate on the working surface;  $\Delta x$  is the pitch of the LEDs in the matrix horizontally;  $\Delta y$  is the pitch of the LEDs in the matrix vertically.

In the considered second variant, the plane of LEDs  $P$  in the matrix is perpendicular to the axis of

the matrix, and, accordingly, to the optical axis  $FR$  of the Fresnel lens (Figure 3a). In this case, the beam  $PK$ , which is the axis of symmetry of the luminous intensity curve (in its direction, the luminous intensity is maximum), is parallel to the axis of the lens. After being refracted by the lens, it passes through the back focus of the lens and hits the working plane  $DR$  at some angle. And the ray of the luminous intensity curve  $PK'$ , the continuation of which passes through the front focus of the lens  $F$  and in the direction of which the intensity of the luminous intensity curve is less than for the ray  $PK$ , after refraction is perpendicular to the working plane  $DR$ .

Another variant of the layout of the LED matrix is possible, using an individual Fresnel lens for each LED (Figure 3b). Here, the plane of each LED  $P$  of the matrix is rotated so that the continuation of the beam  $PK$  on the axis of symmetry of the luminous intensity curve passes through the front focus  $F$  of the lens at such an angle  $\gamma$  that, after refraction by the lens, this beam is perpendicular to the working plane  $DR$ . The angle  $\gamma$  depends on the coordinates of the LED  $P$ , so its values are different for each LED. Since the luminous intensity in the direction of the symmetry axis of the luminous intensity curve is maximum with respect to the rays of other directions, in this case the radiation intensity in the direction perpendicular to the working surface is greater than in the previous case, illustrated in Figure 3a.



**Figure 3** – Scheme of the course of rays with continuation through the front focus of the lens when the axis of symmetry of the light intensity curve is parallel to the axis of the lens (a) and when the axis of symmetry of the light intensity curve passes through the front focus of the lens (b)

For the variant shown in Figure 3a, the illumination distribution is calculated using formulas (2) and (4). For the case illustrated in Figure 3b, instead of formula (2), the expression is used:

$$E_{i,j}(x,y) = \frac{I(\varphi) \cos \alpha}{(l_1 + l_2)^2}, \quad (6)$$

where  $\varphi$  is the angle of inclination of the light beam  $PK'$  to the axis of symmetry  $PK$  of the light intensity curve (Figure 3b),  $\varphi = \beta - \gamma$ ;  $\beta$  is the angle of inclination of the light beam  $PK'$  to the axis of the Fresnel lens  $FL$ , calculated by the formula (3);  $\gamma$  is the angle of inclination of the axis of symmetry  $PK$  of the light intensity curve to the axis of the Fresnel lens  $FL$ .

The angle  $\gamma$  is determined by its projections  $\gamma_x$  and  $\gamma_y$  on the plane  $xOz$  and  $yOz$  similarly to the angle  $\beta$  calculated using the expression (3):

$$\gamma = \arctan \sqrt{\tan^2 \gamma_x + \tan^2 \gamma_y},$$

where  $\tan \gamma_x = \frac{x_P}{f-g}$ ;  $\tan \gamma_y = \frac{y_P}{f-g}$  other designations are given earlier.

In order to evaluate the possibility of practical use of the proposed mathematical model, the results of calculating the illumination distribution on the working surface according to formula (4) were compared with experimental data.

For an experimental study of the dependence of illumination on the distance between the LED matrix and the lens, the distribution of illumination on the plane was measured. The RGB LED matrix had a height of 55 mm and a width of 94 mm, 5 WS2812b LEDs were located vertically, 10 horizontally in 9 mm increments. A rectangular Fresnel lens with a height of 26 cm and a width of 18 cm with a focal length of 20 cm was installed parallel to the matrix plane. The distance between the matrix and the lens was 1 cm. The matrix and the illuminated plane were located at a distance of 50 cm from each other.

Measurements were made at 6 points of the illuminated matrix, starting from the optical axis of the matrix with a step of 10 cm in two directions: horizontally and vertically. 2 devices were used for measurements: the Opplé Light Master III device with a photosensitive diameter of 17 mm (relative measurement error of 5 %, measurement limit of 0–5000 lx) and an original measuring device containing a photodiode with a photosensitive diameter of 6.5 mm, an amplifier and a power supply. The use of the original measuring device made it possible to reduce the diameter of the measuring platform in relation to con-

ventional luxmeters and thereby increase sensitivity to changes in illumination on the plane. The readings of the measuring device were translated into illumination units using a calibration curve. This curve was obtained by measuring different levels of illumination on a plane with a uniform distribution of illumination both by the original device used and by the Yu 116 luxmeter.

For calculations according to formula (3), data on the light intensity curve  $I(\beta)$  of a three-crystal RGB-SMD LED LM1-TPP1-01 TTQ from COTCO with a delta-like arrangement of crystals inside the case [1] having the same arrangement of crystals and the same angle of the light intensity curve ( $120^\circ$ ) were used, as with the WS2812b LED. The calculated values of the matrix pitch, the distances between the matrix, the Fresnel lens and the illuminated plane corresponded to those used in the experiment.

Comparison of the calculation results and experiments showed their correspondence, sufficient to solve the problem of optimizing the distribution of illumination of the working plane in LED sources of local illumination. The standard deviations of the calculated values from the measured values are shown in Table 1.

Table 1

**Standard deviations of calculated values from those measured in relative units**

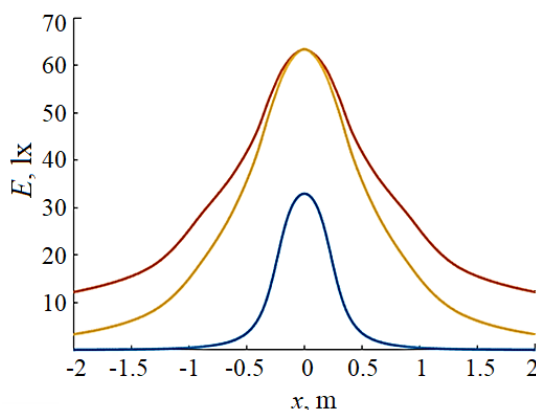
| Distance between lens and matrix, cm | By the $x$ coordinate |                        | By the $y$ coordinate |                        |
|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
|                                      | Original device       | Opplé Light Master III | Original device       | Opplé Light Master III |
| 1                                    | 0.083                 | 0.034                  | 0.085                 | 0.023                  |

It is obvious from the mathematical model that the distribution of illumination on the working plane is a function of the focal length of the Fresnel lens, the distance between the lens and the LED matrix, the distance from the lens to the working plane. To investigate the effect of the focal length of the lens and the distance between the lens and the LED matrix on the illumination distribution on the working plane, calculations of this distribution were made for the distances between the lens and the matrix of 0.5 cm, 1 cm, 1.5 cm and the focal lengths of the lens of 10 cm, 50 cm, 100 cm. The distance from the Fresnel lens to the working plane was chosen to be 50 cm. This distance provides an optimal combination of the height of the lamp for local lighting and



the distance between the light source and the working plane.

The calculation results showed that a change in the distance between the lens and the matrix in the range from 0.5 cm to 1.5 cm slightly affects the distribution of illumination when changing the focal length of the lens in the range from 10 cm to 100 cm. At the same time, at different values of the focal length, the nature of the distribution of illumination and its maximum value changes, which is illustrated in Figure 4.



**Figure 4** – Graphs of the dependence of illumination  $E$  as a function of the spatial coordinate  $x$  for the distance between the Fresnel lens and the matrix of 0.1 cm with a focal length of the lens of 10 cm (lower graph), 50 cm (upper graph), 100 cm (middle graph)

The calculation results indicate that in a given range of numerical values, a change in the focal length affects the nature of the illumination distribution in the working plane to a greater extent than a change in the distance between the lens and the matrix. In addition, with a focal length of 50 cm equal to the selected distance from the lens to the working plane, there is a more uniform distribution of illumination than for focal lengths of 10 cm and 100 cm. At the same time, starting from the focal length value of 50 cm and above, the maximum illumination value does not increase.

### Using the developed mathematical model to optimize the illumination distribution of the working plane in LED sources of local illumination containing a Fresnel lens

Based on the previously developed methodology for calculating the illumination distribution of the working plane [3], variants of LED sources of ge-

neral and local illumination without secondary optics were studied, providing illumination regulated by standards and its uniformity. If it was possible to develop an acceptable option for general lighting that meets the requirements of regulatory documents<sup>2,4</sup>, then an acceptable solution was not found for local lighting.

According to the requirements for local lighting according to GOST R 55710<sup>2</sup> for work with video terminals, writing, typing, reading, data processing, the operational illumination should be 500 lx, and the uniformity of illumination  $k$  (the ratio of the minimum illumination value to the average value on a given surface<sup>2</sup>) should be at least 0.6. In accordance with the Methods of hygienic assessment of indicators of artificial light environment in the premises of buildings and constructions<sup>5</sup> for the distance to the illuminated plane of 0.5 m, the radius of the working area is 0.6 m.

Previous studies [3] have shown that the main problem in the development of an LED source of local illumination without secondary optics was the achievement of the required uniformity of illumination. To calculate the uniformity of illumination in accordance with GOST<sup>2</sup>, it is necessary to find the quotient of the division of the minimum illumination (as a rule, it takes place at the edge of the working area) to the average over the entire working area. Therefore, the uniformity of illumination  $k$ , as well as the values of the illumination itself, is a function of the focal length of the Fresnel lens and the distance between the lens and the LED matrix.

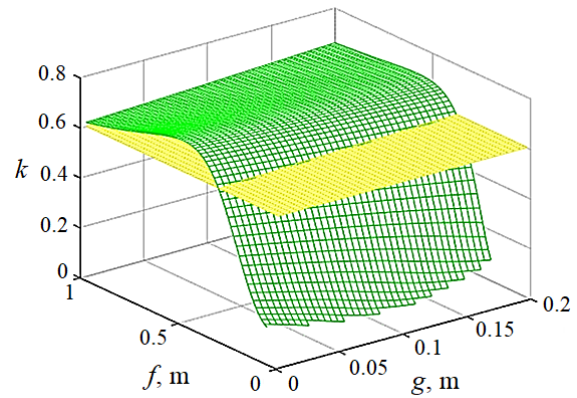
To determine which values of these distances correspond to the required uniformity of illumination, an analytical dependence of the uniformity of illumination  $k$  of the working surface as a function of the focal length  $f$  of the Fresnel lens and its distance  $g$  from the matrix was obtained for three cases. In the

<sup>4</sup> Hygienic standard “Indicators of safety and harmlessness for humans of natural, artificial and combined lighting of residential buildings”. Approved by the Decree of the Ministry of Health of the Republic of Belarus on June 28, 2012 No 82. Access mode: [https://minzdrav.gov.by/upload/lcfiles/text\\_tnpa/000348\\_136669\\_PoatMZ\\_N82\\_2012\\_GN.pdf](https://minzdrav.gov.by/upload/lcfiles/text_tnpa/000348_136669_PoatMZ_N82_2012_GN.pdf). – Access date: 05/03/2023

<sup>5</sup> Methods of hygienic assessment of indicators of artificial light environment in the premises of buildings and structures. Instructions for use // Republican unitary Enterprise “Scientific and practical center of hygiene”. Reg. No. 007-1217. – Minsk, 2018. – 14 p. Access mode: <http://med.by/methods/pdf/007-1217.pdf>. – Access date: 28.01.2022 (in Russian)

first one, one lens is used for the entire matrix and the axes of symmetry of the light intensity curves of the LEDs are parallel to the axis of the lens. The second one also uses one lens for the entire matrix, but the continuations of the axes of symmetry of the light intensity curves pass through the front focus of the lens. In the third case, an individual Fresnel lens is used for each LED. In the first case, formulas (2, 4) were used for calculation, in the second – (6, 4), in the third – (2, 5).

Analysis of the calculation results allows us to conclude that for all three cases the dependencies are similar, and the minimum allowable value of the uniformity of illumination  $k$ , equal to 0.6, corresponds to a large number of possible combinations of focal lengths of the lens and the distances between the lens and the matrix. In addition, changing the distance between the lens and the matrix in the selected range slightly affects the uniformity of illumination. As an example in Figure 5 graphically shows the dependence of the uniformity of illumination on the focal length of the lens and the distance between the lens and the matrix for the first case.



**Figure 5** – The dependence of the uniformity of illumination  $k$ , on the focal length  $f$  of the Fresnel lens and the distance  $g$  between the lens and the LED matrix (the common lens and the axes of the light intensity curves are parallel to the axis of the lens, the yellow plane is the minimum allowable value of the uniformity of illumination  $k$ , equal to 0.6)

From the many combinations of the focal length of the lenses and the distance between the lens and the matrix, for each of the three cases, the combinations given in Table 2 were calculated to ensure maximum uniformity of illumination.

Table 2

**The values of the maximum uniformity of illumination, and the corresponding values of the maximum illumination, the focal length of the lenses and the distance between the lens and the matrix**

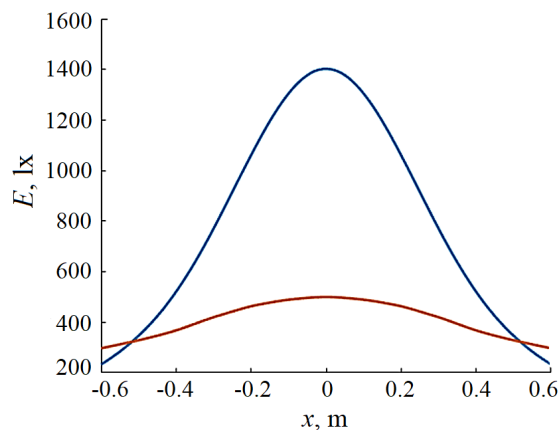
| Type of “lens-matrix” combination                                                                          | Maximum uniformity of illumination $k_{\max}$ | Maximum illumination $E_{\max}$ , lx | Focal length of the lens $f$ , cm | Distance between lens and matrix $g$ , cm |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------|
| A system with a common lens and axes of the light intensity curve parallel to the optical axis of the lens | 0.72364                                       | 63.973                               | 50.29                             | 0.5                                       |
| A system with a common lens and inclined axes of the light intensity curve                                 | 0.72434                                       | 63.812                               | 50.29                             | 0.5                                       |
| System with individual lenses for each LED                                                                 | 0.72364                                       | 63.973                               | 50.29                             | 0.5                                       |

It follows from the analysis of the table that all the values given in it are almost equal. Therefore, the choice of using one of the three options may be due to manufacturability, cost-effectiveness and thermal stability, and other considerations. At the same time, the number of LEDs selected for the calculation does not provide the illumination required by the regu-

latory documents 2.4, equal to 500 lx. An increase in illumination is possible due to an increase in the number of LEDs or by increasing their light output.

The number of LEDs in the matrix providing illumination of 500 lx, found by formula (4) for the values of  $f$  and  $g$  given in Table 2, was 400. The size of such a matrix with a 9 mm LED pitch is 18×18 cm.

Using formula (4), the illumination distribution on the working plane was calculated for a lamp with 400 LEDs with a Fresnel lens for the parameters  $f$  and  $g$  given in Table 2, as well as the illumination distribution was calculated in the absence of a lens and the same distance between the matrix and the working plane. The calculation results are illustrated in Figure 6.



**Figure 6** – Dependence of the illumination distribution  $E$  of the working plane as a function of the spatial coordinate when using a Fresnel lens (red line) and without using a lens (blue line) when illuminated by a matrix (20×20)

It follows from the graph in Figure 6 that the use of a Fresnel lens in conjunction with an RGB matrix made it possible to fulfill the regulatory requirements for illumination and its uniformity, as well as to increase illumination outside the regulatory lighting zone. A matrix without a lens creates excessive illumination in the center of the field and unacceptable unevenness.

A significant number of LEDs (400) in the considered case is due to the low luminous efficiency of RGB LEDs (33.9 lm/W [1]). If it is necessary to reduce their number, it is possible to use more efficient white LEDs or a combined matrix of RGB and white LEDs. In the first case, the ability to adjust the spectral composition will completely disappear, in the second, the possible range of regulation will decrease due to the “dilution” of the radiation from RGB LEDs with white light. To simulate natural radiation, the second option is acceptable, since it allows for the possibility of varying spectral characteristics in a relatively small range inherent in natural radiation.

The required number of LEDs is inversely proportional to the light output. For example, if you replace RGB LEDs with “warm” ones (color tempera-

ture 3000 K) white SMD 1210 (3528) models with a luminous output of 66.7 lm/W, then the illumination distribution shown in Figure 6 will be provided by a matrix of 225 LEDs (15×15).

## Conclusion

A method has been developed for calculating the distribution of illumination created by the combination of “LED matrix – Fresnel lens” when the distance between the lens and the matrix is less than the focal length of the lens. Calculations have shown that a change in the distance between the matrix and the lens from 0.5 cm to 1.5 cm at focal lengths from 10 cm to 100 cm affects the maximum illumination and its uniformity to a lesser extent than a change in focal lengths from 10 cm to 100 cm at distances between the matrix and the lens from 0.5 cm to 1.5 cm.

It is established that the use of a common Fresnel lens for the entire LED matrix as a whole and individual lenses for each LED individually provides almost the same illumination distribution. The rotation of the axes of symmetry of the light intensity curve of the LEDs from a position parallel to the axis of the common lens to a position where the continuations of the axes of symmetry of this curve pass through the front focus of the lens also almost does not change the distribution of illumination. Therefore, it is advisable to choose the optimal one from the above options according to other criteria, for example, manufacturability, economy and thermal stability.

## References

1. Nikiforov S. «S-klass» poluprovodnikovoj svetotekhniki [“S-class” of semiconductor lighting engineering]. *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2009, no. 6, pp. 88–91 (in Russian).
2. Popova I.G., Grebenyuk T.I., Podoltsev V.V. *Postroenie i approksimaciya diagramm napravlenosti svetodiodov* [Construction and approximation of LED directional diagrams]. *Molodoj issledovatel' Dona* [Young researcher of the Don], 2019, no. 5(20), pp. 71–75 (in Russian).
3. Bogdan P.S., Zaytseva E.G., Baranov P.O., Stepanenko A.I. Analysis of illumination generated by LED matrices distribution. *Devices and Methods of Measurements*, 2022, vol. 13, no. 1, pp. 60–67.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-1-60-67
4. Shen D. *Kollimatorye linzy Edison Opto* [Collimator lenses Edison Opto]. *Poluprovodnikovaya*

*svetotekhnika* [Semiconductor lighting engineering], 2013, no. 1(21), pp. 20–21. [Electronic Resource]. Available at: [https://led-e.ru/assets/listalka/2013\\_1/2013\\_1/assets/common/downloads/publication.pdf](https://led-e.ru/assets/listalka/2013_1/2013_1/assets/common/downloads/publication.pdf) (accessed: 27.01.2022) (in Russian).

5. Vertli Y. *Linzy s nastraivaemym fokusom dlya svetodiodov* [Lenses with adjustable focus for LEDs]. *Semiconductor lighting*, 2013, no. 1(21), pp. 22–23. [Electronic Resource]. Available at: [https://led-e.ru/assets/listalka/2013\\_1/2013\\_1/assets/common/downloads/publication.pdf](https://led-e.ru/assets/listalka/2013_1/2013_1/assets/common/downloads/publication.pdf) (accessed: 27.01.2022) (in Russian).

6. Da Silva H. *Sovershenstvovanie konstrukcij svetodiodnyh lamp s pomoshch'yu plastichnyh opticheskikh silikonov* [Improvement of LED lamp designs using plastic optical silicones]. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika* [Semiconductor lighting engineering], 2013, no. 1(21), pp. 26–27. [Electronic Resource]. Available at: [https://led-e.ru/assets/listalka/2013\\_1/2013\\_1/assets/common/downloads/publication.pdf](https://led-e.ru/assets/listalka/2013_1/2013_1/assets/common/downloads/publication.pdf) (accessed: 27.01.2022) (in Russian).

7. Barbosa J., Calixto W., da Cunha Brito L. Secondary Lens Optimization for LED Lamps. *Journal of mechanics engineering and automation*, 2014, no. 4, pp. 46–51.

8. Moiseev M. *Nizkoprofil'nye linzy ot Khatod: novyy «kosmicheskij» vzglyad* [Low-profile lenses from Khatod: a new “cosmic” look]. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika* [Semiconductor lighting engineering], 2017, no. 5(49), pp. 44–46 (in Russian).

9. Trofimov O., Golikov O. *Reflektory i gibridnye linzy ot Ledlink Optics* [Reflectors and hybrid lenses

from Ledlink Optics]. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika* [Semiconductor lighting engineering], 2013, no. 1(21), pp. 24–25. [Electronic Resource]. Available at: [https://led-e.ru/assets/listalka/2013\\_1/2013\\_1/assets/common/downloads/publication.pdf](https://led-e.ru/assets/listalka/2013_1/2013_1/assets/common/downloads/publication.pdf) (accessed: 27.01.2022) (in Russian).

10. Jian V., Schneider K. *Uluchshenie osveshchennosti ob"ekta pri ispol'zovanii optiki s polnym vnutrennim otrazheniem* [Improving the illumination of an object when using optics with full internal reflection]. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika* [Semiconductor lighting engineering], 2013, no. 1(21), pp. 28–30. [Electronic Resource]. Available at: [https://led-e.ru/assets/listalka/2013\\_1/2013\\_1/assets/common/downloads/publication.pdf](https://led-e.ru/assets/listalka/2013_1/2013_1/assets/common/downloads/publication.pdf) (accessed: 27.01.2022) (in Russian).

11. Sharakshane A. *Ob effektivnosti matovyh svetorasseivatelej* [On the effectiveness of matte light diffusers]. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika* [Semiconductor lighting engineering], 2014, no. 1(27). [Electronic Resource]. Available at: <https://led-e.ru/vtorichnaya-optika/ob-effektivnosti-matovyh-svetorasseivatelej-2> (accessed: 28.01.2022) (in Russian).

12. Ferrini R., Fernandez O., Barruetabena L., Ivanovich S. *Ul'tratonkij svetodiodnyj modul' pryamoj podsvetki s tonkoplennoj opticheskoy sistemoy* [Ultrathin LED direct illumination module with a thin-film optical system]. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika* [Semiconductor lighting engineering], 201, no. 5(49), pp. 32–38 (in Russian).



DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-106-114

## Проект автономного микрокатаера с лазерным устройством для оценки загрязнения микропластиком акватории водоёмов

В.А. Алексеев<sup>1</sup>, С.И. Юран<sup>2</sup>, М.Р. Зарипов<sup>3</sup>, В.П. Усольцев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,  
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия

<sup>2</sup>Удмуртский государственный аграрный университет,  
ул. Студенческая, 11, г. Ижевск 426069, Россия

<sup>3</sup>Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук,  
ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия

Поступила 12.05.2023

Принята к печати 19.06.2023

Загрязнение акваторий водоёмов частицами микропластика размером менее 5 мм является серьезной экологической проблемой. Обычно исследования загрязнений водоёмов проводят методом взятия проб воды с дальнейшей их оценкой в лаборатории. Поэтому актуальной является задача исследования акваторий водоёмов на наличие пластика в режиме реального времени с выявлением пятен обширных загрязнений.

В статье рассматривается проект создания автономного беспилотного исследовательского аппарата, работающего в акватории водоёма, с передачей данных исследований в центр обработки информации. Аппарат производит лазерное зондирование водной среды для обнаружения микрочастиц полиэтилена и построения карт пятен загрязнений в исследуемой акватории водоёма.

Для реализации предлагаемого проекта решаются следующие задачи:

– обнаружение микрочастиц пластика в исследуемом объёме водной среды, где размеры частиц на несколько порядков меньше исследуемого объёма;

– идентификация микрочастиц при наличии в исследуемом объёме водной среды частиц других видов веществ;

– оценка количества частиц в условном объёме водной среды.

Предлагается новый подход, заключающийся в создании автономного микрокатаера, который исследует акваторию водоёма по маршруту, задаваемому из центра управления, находящегося на берегу. Исследование предполагает обнаружение микрочастиц в определённом объёме жидкости, протекающей через исследовательскую трубу, установленную в днище катаера. Внутри трубы расположена труба Шаубергера, в центральной части которой концентрируются частицы, что позволяет проводить поиск частиц при зондировании лазерным излучением с длиной волны около 3,5 мкм, на которой пиковое поглощение излучения полиэтиленом многократно превышает поглощение излучения водой.

Для обеспечения энергоэффективности микрокатаера предложено использовать схему сложения импульсов лазерного излучения с использованием оптоволоконной линии оптической задержки. Это позволяет почти на порядок уменьшить энергопотребление лазера. Предлагаемый проект катаера позволит проводить исследования крупных водоёмов с определением пятен загрязнений микрочастицами пластика. В статье приведены примеры используемого оптоволокна, фотоприёмника и лазерного излучателя для решаемой задачи.

**Ключевые слова:** лазерное зондирование, микрокатаер, микрочастицы пластика

Адрес для переписки:

Юран С.И.

Удмуртский государственный аграрный университет,  
ул. Студенческая, 11, г. Ижевск 426069, Россия  
e-mail: yuran-49@yandex.ru

Address for correspondence:

Yuran S.I.

Udmurt State Agrarian University,  
Studencheskaya str., 11, Izhevsk 426069, Russia  
e-mail: yuran-49@yandex.ru

Для цитирования:

В.А. Алексеев, С.И. Юран, М.Р. Зарипов, В.П. Усольцев.  
Проект автономного микрокатаера с лазерным устройством  
для оценки загрязнения микропластиком акватории водоёмов.  
Приборы и методы измерений.  
2023. – Т. 14, № 2. – С. 106–114.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-106-114

For citation:

V.A. Alekseev, S.I. Yuran, M.R. Zaripov, V.P. Usoltsev.  
[The Project of an Autonomous Microboat with a Laser Device  
for Estimation of Water Area Pollution by Microplastic].  
Devices and Methods of Measurements.  
2023, vol. 14, no. 2, pp. 106–114 (in Russian).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-106-114

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-106-114

# The Project of an Autonomous Microboat with a Laser Device for Estimation of Water Area Pollution by Microplastic

V.A. Alekseev<sup>1</sup>, S.I. Yuran<sup>2</sup>, M.R. Zaripov<sup>3</sup>, V.P. Usoltsev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kalashnikov Izhevsk State Technical University,  
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia

<sup>2</sup>Udmurt State Agrarian University,  
Studencheskaya str., 11, Izhevsk 426069, Russia

<sup>3</sup>Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia

Received 12.05.2023

Accepted for publication 19.06.2023

## Abstract

Water area pollution by microplastic particles smaller than 5 mm is a serious environmental problem. Usually, studies of water pollution are carried out by taking water samples with their further analysis in the laboratory. Therefore, study of the water areas for the presence of plastic with the identification of extensive pollution sites in real time is actual.

The project of an autonomous unmanned research vehicle operating in water area and transferring the research data to the information processing center is discussed in the article. The device produces laser probing of the aquatic environment to detect polyethylene microparticles and to build maps of pollution sites in the studied water area.

To implement the proposed project, the following tasks are solved:

- detection of plastic microparticles in the studied volume of the water environment where particle sizes are several orders of magnitude smaller than the studied water volume;
- identification of microparticles in presence of particles of other types of substances in the investigated water environment volume;
- estimation of the number particles' in the studied water environment volume.

A new approach which consists in creating an autonomous microboat that explores the water area along a route set from a control center located on the shore is proposed. The study involves the detection of microparticles in a certain volume of liquid flowing through a research tube installed in the bottom of the boat. There is a Schauburger tube in the central part of which particles are concentrated inside the tube. It makes possible to search for particles by laser probing with a wavelength about 3.5  $\mu\text{m}$ , on which the peak absorption of light by polyethylene many times exceeds the water absorption.

To ensure the energy efficiency of the microboat it is proposed to use a scheme for laser pulses combining using a fiber-optic delay line. This makes it possible to reduce the power consumption of the laser by almost an order of magnitude. The proposed project of the boat will make it possible to conduct studies of large water areas with the detection of plastic microparticles' pollution sites. Examples of the used optical fiber, photodetector and laser source for the problem being solved are derived in the article.

**Keywords:** laser probing, microboat, plastic microparticles

---

### Адрес для переписки:

Юран С.И.

Удмуртский государственный аграрный университет,  
ул. Студенческая, 11, г. Ижевск 426069, Россия  
e-mail: yuran-49@yandex.ru

---

### Address for correspondence:

Yuran S.I.

Udmurt State Agrarian University,  
Studencheskaya str., 11, Izhevsk 426069, Russia  
e-mail: yuran-49@yandex.ru

---

### Для цитирования:

В.А. Алексеев, С.И. Юран, М.Р. Зарипов, В.П. Усольцев.  
Проект автономного микроката с лазерным устройством  
для оценки загрязнения микропластиком акватории водоёмов.  
Приборы и методы измерений.  
2023. – Т. 14, № 2. – С. 106–114.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-106-114

---

### For citation:

V.A. Alekseev, S.I. Yuran, M.R. Zaripov, V.P. Usoltsev.  
[The Project of an Autonomous Microboat with a Laser Device  
for Estimation of Water Area Pollution by Microplastic].  
Devices and Methods of Measurements.  
2023, vol. 14, no. 2, pp. 106–114 (in Russian).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-106-114

## Введение

Все возрастающая загрязненность водной среды микропластиком представляет потенциальную угрозу для человечества [1, 2]. В связи с этим требуется оперативно выявлять наличие микропластика в водной среде и принимать действенные меры для улучшения экологической обстановки акваторий водоемов.

Для этого необходимо взять пробы водной среды и провести их анализ. Однако еще не сложились единые подходы, методы и методики отбора и анализа проб микропластика в водной среде. Для отбора проб на содержание частиц микропластика различного размера требуются разные типы оборудования и применение различных аналитических лабораторных методов [3]. Отбор полнообъемных проб воды без концентрирования в них пластика применяется редко в связи с малой концентрацией пластика в такой пробе. Наиболее часто применяется концентрирование при отборе проб воды путём уменьшения объёма исходной пробы, а для дальнейшей обработки и анализа сохраняется только небольшая её часть, содержащая микропластик. Это осуществляется за счёт фильтрации больших объёмов воды с помощью, например, планктонных сетей. Они позволяют проводить репрезентативный отбор с большой площади поверхности воды, отбирать частицы микропластика различных размеров. Для отбора проб с поверхностного слоя воды могут использоваться сети, которые буксирует катамаран, движущийся со скоростью 1–5 узлов. Время буксировки может составлять от нескольких минут до нескольких часов, в зависимости от концентрации взвешенного вещества в воде.

Для сбора частиц микропластика нашли применение различного вида пробоотборники [4, 5]. Например, в патенте [6] описан пробоотборник для определения содержания микропластика в морской воде. Он снабжён электрическим погружным насосом, аккумулятором в водонепроницаемом боксе, счётчиком воды, герметичной насадкой со сменными металлическими фильтрами различного размера ячеек. Пробоотборник опускается в воду с борта судна или лодки. После завершения отбора пробы устройство извлекается из воды, производится фиксация показателей счётчика

воды, фильтровальная насадка снимается и переносится в лабораторию для выемки фильтров и дальнейшего анализа.

Для анализа подготовленных проб микропластика, содержащегося в морской среде, в настоящее время используются в основном лабораторные методы [7]. Для идентификации микропластика применяются такие аналитические методики, как спектроскопия комбинационного рассеяния, сканирующая электронная микроскопия и некоторые её разновидности, ИК-Фурье спектроскопия. Наиболее распространена идентификация микропластика с применением ИК-спектроскопии [8]. При использовании данного метода проводится сравнение ИК-спектра поглощения или пропускания образца со спектрами известных синтетических веществ. Для этого применяются различные спектрометрические приборы: инфракрасный спектрометр, ИК-Фурье спектрометр и ИК-спектроскоп для работы в ближней ИК области спектра. В работе [9] для ИК-анализа использовался квантово-каскадный лазер (QCL), работающий в средней инфракрасной области спектра. Достоинством спектроскопии комбинационного рассеяния является отсутствие необходимости в пробоподготовке, возможность проводить измерения непосредственно в воде.

Однако известные приборы и способы обнаружения микрочастиц не позволяют проводить оценку загрязнений микрочастицами в реальном масштабе времени. Более того, в ряде способов оценки мутности предлагается предварительно очистить пробы от отдельных микрочастиц. Обнаружение и идентификация микрочастиц при их достаточно малых концентрациях в жидкости является сложной задачей. Поэтому задача создания подобного класса анализаторов микрочастиц является актуальной для экологического контроля.

## Предлагаемые решения для реализации проекта

В данной работе предлагается создание лазерной установки для контроля наличия полиэтилена малого размера в различных крупных водоёмах. Данная лазерная установка будет установлена в беспилотное водное транспортное средство. Как пример, можно рассмотреть беспилотное водное транспортное средство

для экологического мониторинга воды [10]. Данное транспортное средство, используя энергию солнца и ветра, способно автономно работать вплоть до 10 месяцев, передавая и принимая информацию с помощью радио-передатчика.

Предлагаемый проект будет выполнять ряд задач.

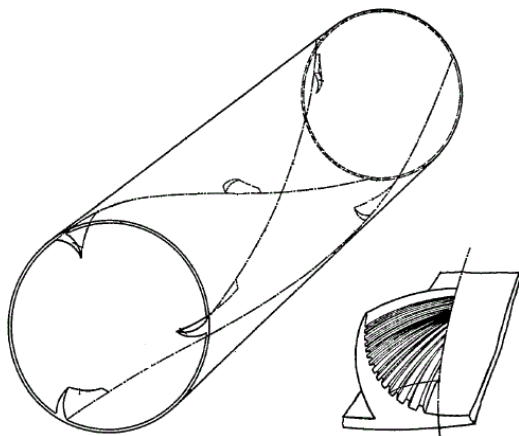
1. Определение микрочастиц в большом объеме воды, значительно превышающем размеры частиц, которые находятся в диапазоне 0,5–5 мм.

2. Идентификация микрочастиц полиэтилена в водной среде.

3. Определение частиц в режиме реального времени.

Указанные задачи будут решаться следующим образом. При движении катера по водной поверхности происходит поступление потока воды в измерительную трубу, где происходит скопление микрочастиц в центральной части потока за счёт использования эффекта закручивания потока жидкости в трубе Шаубергера. Далее лазерное излучение с выбранной длиной волны излучения, позволяющего идентифицировать микрочастицы по спектральному поглощению полиэтилена, зондирует центральную часть потока жидкости. Фиксация наличия частиц в исследованном потоке происходит в режиме реального времени [11].

На рисунке 1 представлена конструкция трубы Шаубергера [12] с двухпоточным спиральным течением.



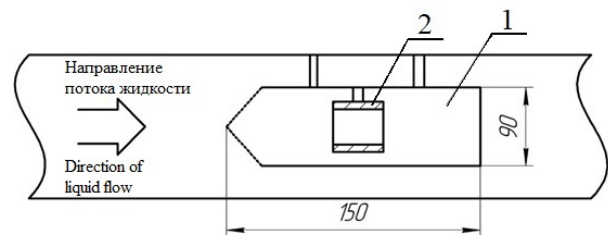
**Рисунок 1** – Конструкция трубы Шаубергера с двухпоточным спиральным течением

**Figure 1** – Construction of a Schauberger tube with a two-flow spiral flow

В данной трубе есть специальной формы лопасти, которые разделяют водный поток. Периферические водные массы идут по центробежному пути, в то время как центральный поток воды проходит центростремительный путь. Тела, находящиеся в трубе Шаубергера, обладающие плотностью несколько больше плотности воды и небольших размеров, перемещаются в центр [12].

Так как плотность полиэтилена ( $1125 \text{ кг/м}^3$ ) больше плотности морской воды ( $1030 \text{ кг/м}^3$ ), то при прохождении через трубу Шаубергера частицы полиэтилена будут скапливаться в центре трубы [13, 14].

Трубу Шаубергера можно разместить внутри измерительной трубы, через которую проходят потоки воды (рисунок 2). В левой части поверхности трубы Шаубергера необходимо сделать отверстия диаметром 5 мм с шагом в 10 мм. Это необходимо для того, чтобы в трубу попадали только частицы размером менее 5 мм.



**Рисунок 2** – Расположение трубы Шаубергера внутри измерительной трубы: 1 – труба Шаубергера; 2 – втулка с оптической системой

**Figure 2** – Location of the Schauberger tube inside the measuring tube: 1 – Schauberger tube; 2 – bushing with optical system

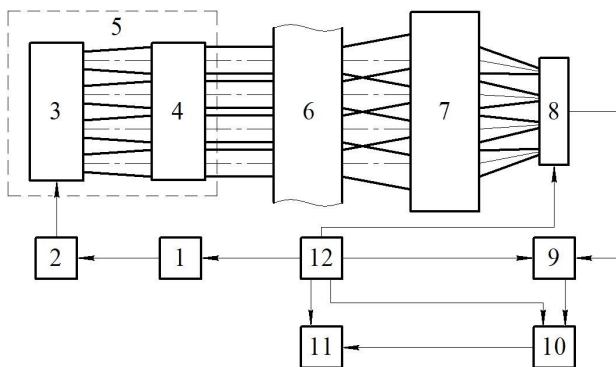
С помощью трубы Шаубергера создается разделение потоков воды, в результате чего частицы полиэтилена будут двигаться в центральном потоке и проходить через втулку с оптической системой (рисунок 2).

На рисунке 3 приведена структурная схема установки для лазерного зондирования водной среды.

Установка содержит трубу Шаубергера, в которой находятся передающая и приёмная части электронно-оптической схемы установки, а также блок питания и управления 12. Передающая часть содержит лазер 1, блок сложения импульсов 2, оптический разветвитель 3, который разделяет излучение, выстраивая



его в полосу, и направляет излучение в коллимирующую систему 4. Коллиматор уменьшает расходимость лазерного излучения, обеспечивая сканирование водного потока. Оптическое излучение с помощью блока излучателей 5 зондирует водную среду 6. Излучение лазера, которое не было поглощено водой и микрочастицами, попадает через приёмную систему 7 на фотоприёмный блок 8 и далее на усилитель 9. Усиленный сигнал поступает в блок обработки 10 и далее в радиопередатчик 11. По каналу радиосвязи полученные данные поступают в центр управления беспилотным судном, а именно, в приёмную станцию, которая в свою очередь передает сигнал в персональный компьютер. Компьютер, используя специальное программное обеспечение, определяет наличие или отсутствие полиэтилена в сканированной области водной среды. В результате оператор на основе полученной информации контролирует работу установки и загрязненность микропластиком водной среды.



**Рисунок 3** – Структурная схема установки: 1 – лазер; 2 – блок сложения импульсов, включающий в себя средство кольцевой оптической задержки, коммутирующее устройство, фокусирующую систему, счётчик импульсов; 3 – оптический разветвитель; 4 – коллимирующая система; 5 – блок излучателей; 6 – водная среда; 7 – приёмная система; 8 – фотоприёмный блок; 9 – усилитель; 10 – блок обработки; 11 – радиопередатчик; 12 – блок питания и управления

**Figure 3** – Structural scheme of setup: 1 – laser; 2 – beam combining unit, including a means of ring optical delay device, commutating device, focusing system, pulse counter; 3 – optical splitter; 4 – collimating system; 5 – radiation unit; 6 – water environment; 7 – receiving system; 8 – optical receiver unit; 9 – amplifier; 10 – block processing; 11 – radio transceiver; 12 – power supply and control unit

Фиксация и идентификация микрочастиц в выделенном объёме воды, определяемом размерами втулки в основной трубе потока воды, требует решения ряда проблем.

Во-первых, это выбор длины волны зондирования исследуемого объёма водной среды. Анализ спектра микропластика из полиэтилена показал, что резкое поглощение излучения происходит в диапазоне длин волн 3,0–3,5 мкм, а точнее в области двух пиков в спектре поглощения излучения полиэтиленом (3,426 и 3,507 мкм). При этом на этих длинах волн коэффициент поглощения излучения водой менее 40 %, а коэффициент поглощения оптического излучения полиэтиленом на указанных длинах волн составляет 80 и 90 процентов соответственно [13–17]. Следовательно, при зондировании импульсами лазерного излучения в этом диапазоне длин волн с амплитудой, превышающей порог распознавания, возможна фиксация микропластика в потоке жидкости, движущейся по трубе. Учитывая размеры блока излучателей и фотоприёмного блока, диаметр трубы может быть около 40 мм. В качестве источника излучения можно использовать DFB лазерный диод с длинами волн близкими к указанным пикам в спектре поглощения полиэтилена и выходной мощностью 1 мВт.

Во-вторых, в малом объёме воды во втулке возможно появление одновременно нескольких микрочастиц на одной условно линии длиной 5–10 мм. Перекрывание нескольких частиц в направлении пучка излучения, а также поворот частицы ребром не будут зафиксированы, но вероятность таких положений микрочастиц мала. Для фиксации нескольких частиц предложено использовать мозаичный фотоприёмник, содержащий около десяти чувствительных площадок, расположенных в линейку, размером около 10 мм. Это позволяет одновременно фиксировать около десятка микрочастиц. Со стороны излучателя установлен элемент формирования излучения в световую плоскость, перпендикулярную к потоку жидкости во втулке.

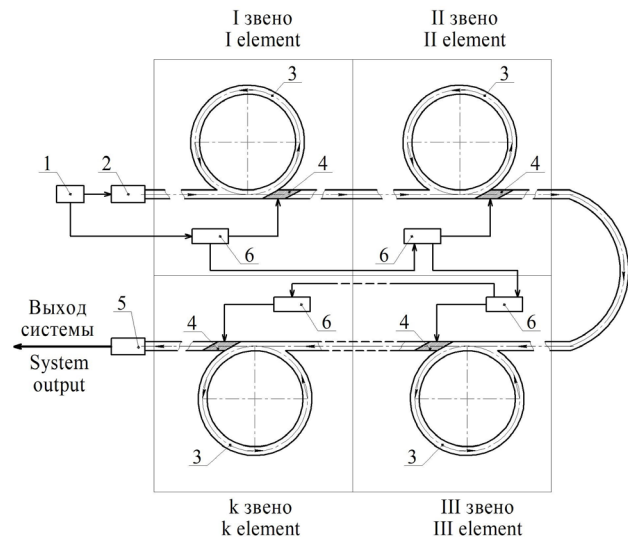
Кроме того, одной из проблем реализации проекта является создание режима энергосбережения при работе микрокатера. При этом наибольшие затраты энергии идут на работу двигателя катера и лазера, непрерывно генерирующего излучение для зондирования

потока воды для выявления микрочастиц пластика. Выбор экономичного двигателя возможен при использовании импульсных микродвигателей. Экономия энергии на питание лазера возможна при использовании систем накопления энергии импульсов излучения с применением кольцевой линии задержки на оптоволокне [18, 19]. Действие таких предлагаемых устройств заключается в синхронном сложении нескольких лазерных импульсов, поступающих последовательно на вход кольцевой линии задержки, без увеличения энергопотребления лазера. При этом пучок, циркулирующий в кольце, накапливает в себе за счёт сложения энергию излучения с каждым обходом по линии задержки. В системе происходит суммирование лазерных импульсов, при этом линия задержки обеспечивает синхронизацию предыдущего импульса с последующим, поступающим в неё от лазерного источника.

В данной работе предлагается использовать в составе разрабатываемого микрокатера систему, содержащую несколько кольцевых линий задержки, так как расчеты показывают, что применение 2–3 колец задержки позволит поднять энергию импульса зондирования более чем в 10 раз без увеличения энергии питания, потребляемой источником лазерного излучения [18]. Данные линии задержки должны быть изготовлены из волоконных световодов, прозрачных для лазерного излучения на длине волны около 3,5 мкм. В качестве них можно использовать, например, оптоволокна, приведенные в работе [20].

Предлагаемая система, позволяющая повысить мощность зондирующего излучения при сохранении энергопотребления на прежнем уровне, представлена на рисунке 4. Она состоит из задающего перестраиваемого генератора прямоугольных импульсов 1, импульсного лазера 2 и нескольких звеньев, соединённых последовательно. Звенья содержат средство кольцевой оптической задержки 3, коммутирующее устройство 4 и счётчик импульсов 6, соединённый с управляющим входом коммутирующего устройства 4. Выход задающего генератора 1 соединён через счётчик импульсов 6 с управляющим входом коммутирующего устройства 4 каждого из звеньев. Блоки 2, 3, 4 оптически связаны между собой. Импульсный лазер 2 соединён со средством 3 кольцевой оптической задержки первого I звена.

Коммутирующее устройство 4 предыдущего звена связано со средством 3 кольцевой оптической задержки следующего за ним звена. Количество звеньев источника излучения определяется затуханием оптического сигнала, циркулирующего по кольцевой линии задержки. Последнее  $k$  звено соединено с фокусирующей системой 5.



**Рисунок 4** – Схема источника импульсного лазерного излучения: 1 – задающий генератор; 2 – импульсный лазер; 3 – средство кольцевой оптической задержки; 4 – коммутирующее устройство; 5 – фокусирующая система; 6 – счётчик импульсов

**Figure 4** – Diagram of a pulsed laser radiation source: 1 – master generator; 2 – pulsed laser; 3 – ring optical delay device; 4 – commutating device; 5 – focusing system; 6 – pulse counter

Источник импульсного лазерного излучения работает следующим образом. Импульсы с задающего генератора 1 поступают на вход импульсного лазера 2. Импульсы оптического излучения с лазера 2 через заданный период  $T$  поступают на средство кольцевой оптической задержки 3 первого I звена. Импульс оптического излучения циркулирует по кольцу оптоволокна до момента поступления в линию задержки нового импульса от лазера, и цикл продолжается до определённого количества оборотов  $N_1$ , зависящего от допустимого затухания в линии задержки. При этом с выхода счётчика импульсов 6, настроенного на частоту  $(1/T)$ , на управляющий вход коммутирующего устройства 4 поступают электрические импульсы с частотой в  $N_1$  раз меньше частоты  $(1/T)$  импульсов, вырабатываемой задающим генератором 1. При поступлении

электрического импульса со счётчика 6 на управляющий вход коммутирующего устройства 4, коммутирующее устройство переключает канал циркуляции оптического излучения по кольцевой оптической задержке 3 на выход коммутирующего устройства 4, где формируется импульс оптического излучения с амплитудой, равной сумме интенсивностей импульсов лазерного излучения, поступивших на вход средства кольцевой оптической задержки за период  $N_1 \cdot T$ , определяемый периодом следования импульсов со счетчика 6. Далее усиленный оптический импульсный сигнал с выхода коммутирующего устройства 4 первого *I* звена источника излучения поступает на средство кольцевой оптической задержки 3 второго *II* звена источника излучения и после заданного числа циркуляций  $N_2$  по линии задержки, определяемого счётчиком 6, настроенного на частоту  $(1/N_1 \cdot T)$ , второго *II* звена источника излучения, поступает на вход коммутирующего устройства 4 второго *II* звена источника излучения. С выхода коммутирующего устройства 4 усиленный оптический сигнал поступает на элементы в третьем *III* звене источника излучения. Аналогичный процесс усиления оптического импульсного сигнала происходит и в следующих звеньях *III* – *k*. В последнем *k* звене счётчик импульсов 6 настроен на частоту  $(1/N_1 N_2 \dots N_{k-1} T)$ . На выходе коммутирующего устройства последнего *k* звена усиленный в результате синхронного сложения импульсов лазерный пучок фокусируется фокусирующей системой 5. При этом частота следования импульсов на выходе устройства будет в  $N_1 N_2 \dots N_k$  раз ниже частоты  $(1/T)$  излучаемых лазером исходных импульсов.

В результате на выходе предложенного устройства образуется импульсное лазерное излучение, значительно превосходящее по интенсивности импульсы на выходе первого *I* звена источника лазерного излучения и исходных импульсов излучения лазера 2.

Для регистрации излучения после прохождения потока воды в диапазоне более 3 мкм можно использовать фотодиоды, работающие в диапазоне длин волн 3,2–3,5 мкм [21]. Управление катером происходит по радиосвязи, маршрут движения создаётся с помощью компьютера, находящегося в центре управления на берегу. По этой связи передаются данные о фиксации микрочастиц. Основным

показателем, получаемым при обнаружении частиц, является отношение количества частиц к объёму воды, прошедшей за определенное время через трубу исследования воды. При движении катера вдоль условной линии курса движения катера будет получена характеристика распределения частиц по этой линии. При обнаружении скопления частиц возможно осуществить управляемое движение катера, осуществляя сканирование определённого места акватории водоёма. Это позволит строить карты пятен скопления микрочастиц в исследуемой акватории.

## Заключение

Получено решение по созданию автономного микрокатера с лазерным устройством для оценки загрязнения микропластиком акватории водоёмов для исследования акватории крупных водоёмов на загрязнения микрочастицами пластика.

При этом предложено решение двух основных задач: обнаружение микрочастиц полиэтилена в толще водной среды и экономное по энергии, затрачиваемое на питание лазера. Лазерное зондирование среды производится импульсами, которые получены в результате сложения пачки импульсов при уменьшении частоты повторения импульсов без увеличения энергии питания лазера (пассивный метод).

Первая задача решена, благодаря использованию трубы Шаубергера, которая обеспечивает скопление микрочастиц пластика в центре исследуемого потока водной среды и свойства полиэтилена, у которого пик поглощения лазерного излучения на длине волны около 3,5 мкм на порядок превышает поглощение водой на этой длине волны.

Вторая задача решена за счёт применения схемы увеличения энергии импульса излучения с использованием оптоволоконной линии задержки, что позволяет на порядок снизить энергозатраты на генерацию лазерного излучения. Обе задачи подтверждены патентами на изобретение и полезную модель.

Решение указанных двух задач обеспечивает создание микрокатера для исследования акватории водоёмов на загрязнения микропластиком.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке научного оборудо-

дования для экспедиционных исследований водоёмов и получения информации в режиме реального времени.

## Список использованных источников

1. Plastic Pollution in the World's Oceans [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0111913> (дата доступа: 04.05.2023).

2. Ильина О.В. Пластиковое загрязнение прибрежных поверхностных вод среднего и южного Байкала / О.В. Ильина, М.Ю. Колобов, В.В. Ильинский // Водные ресурсы. – 2021. – Т. 48. – № 1. – С. 42–51. DOI: 10.31857/S0321059621010181

3. Зобков М.Б. Микропластик в морской среде: обзор методов отбора, подготовки и анализа проб воды, донных отложений и береговых наносов / М.Б. Зобков, Е.Е. Есюкова // Океанология. – 2018. – Т. 58. – № 1. – С. 149–157. DOI: 10.7868/S0030157418010148

4. Lenz R., Labrenz M. Small Microplastic Sampling in Water: Development of an Encapsulated Filtration Device. *Water*, 2018, vol. 10, iss. 8, p. 1055. DOI: 10.3390/w10081055

5. Hildebrandt L. [et al.] Evaluation of continuous flow centrifugation as an alternative technique to sample microplastic from water bodies. *Marine Environmental Research*, 2019, vol. 151, p. 104768.

DOI: 10.1016/j.marenvres.2019.104768

6. Патент 206110 РФ, МПК G01N 1/02. Пробо-отборник для определения содержания микропластика в морской воде (HydroPuMP) / А.А. Ершова, Ю.А. Татаренко // Заявитель: Российский государственный гидрометеорологический университет. Заявка № 2020144043 от 28.12.2020. Оpubл. 24.08.2021. Бюл. № 24.

7. Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R.C., Thiel M. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification. *Environ. Sci. Technol.*, 2012, vol. 46, no. 6, pp. 3060–3075 DOI: 10.1021/es2031505

8. Ourgaud M. [et al.] Identification and Quantification of Microplastics in the Marine Environment Using the Laser Direct Infrared (LDIR) Technique. *Environ. Sci. Technol.*, 2022, vol. 56, no. 14, pp. 9999–10009. DOI: 10.1021/acs.est.1c08870

9. Yang J. [et al.] Microplastics in different water samples (seawater, freshwater, and wastewater): Methodology approach for characterization using micro-FTIR spectroscopy. *Water Research*, 2023, vol. 232, no. 1. p. 119711 DOI: 10.1016/j.watres.2023.119711

10. Coldewey D. Sairdronе takes the wraps off its Voyager autonomous research vessel. *Tech Crunch*, March 2023. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://www.sairdronе.com/technology/vehicles> (дата доступа: 04.05.2023).

11. Патент 2775302 РФ, МПК G01N 1/10, G01N 21/01. Устройство для отбора и оценки проб жидкости / В.А. Алексеев, В.П. Усольцев, С.И. Юран // Заявитель Ижевская государственная сельскохозяйственная академия. Заявка № 2021130069 от 14.10.2021. Оpubл. 29.06.2022. Бюл. № 19.

12. Шаубергер В. Энергия воды / В. Шаубергер. – Москва: Эксмо, 2007. – 320 с.

13. Збинден Р. Инфракрасная спектроскопия высокополимеров / Р. Збинден. – М.: Мир, 1966. – 355 с.

14. Шыхалиев К.С. Изучение механизма сшивания и структуры сшитого полиэтилена / К.С. Шыхалиев // Евразийский союз ученых. – 2018. – № 4. – С. 73–77.

15. Спектры молекул и твердых тел. Спектр поглощения воды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.myshared.ru/slide/644303/> (дата доступа: 04.05.2023).

16. Юхневич Г.В. Инфракрасная спектроскопия воды / Г.В. Юхневич. – М.: Наука, 1973. – 210 с.

17. Купцов А.Х. Фурье-КР и Фурье-ИК спектры полимеров / А.Х. Купцов, Г.Н. Жижин. – Москва: Техносфера, 2013. – 696 с.

18. Алексеев В.А. Повышение пиковой мощности импульсного источника лазерного излучения с применением кольцевой волоконной линии задержки / В.А. Алексеев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10, № 2. – С. 151–159. DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-151-159

19. Патент 189439 РФ, МПК H01S 3/10, G02B 6/00. Источник импульсного лазерного излучения / В.А. Алексеев [и др.] // Заявитель Ижевский ГТУ имени М.Т. Калашникова. Заявка №2018137513 от 23.10.2018. Оpubл. 22.05.2019. Бюл. № 15.

20. Отечественные разработки ИК оптических материалов на основе твердых растворов галогенидов серебра и одновалентного таллия / Л.В. Жукова [и др.] // Оптика и спектроскопия. – 2018. – Т. 125. – Вып. 6. – С. 763–773. DOI: 10.21883/OS.2018.12.46936.156-18

21. Mid-Infrared (MIR) Photodiode: Electro Optical Components, Inc. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.eoc-inc.com/> (дата доступа: 03.06.2023).

## References

1. Plastic pollution of the world's oceans [Electronic Resource]. Available at: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0111913> (accessed: 04.05.2023).

2. Il'ina O.V., Kolobov M.YU., Il'inskij V.V. *Plastikovoе zagryaznenie pribrezhnyh poverhnostnyh vod*



*srednego i yuzhnogo Bajkala* [Plastic pollution of the coastal surface water in the middle and southern Baikal]. *Vodnye resursy* [Water resources], 2021, vol. 48, no. 1, pp. 56–64 (in Russian).

**DOI:** 10.1134/S0097807821010188

3. Zobkov M.B., Esyukova E.E. *Mikroplastik v morskoy srede: obzor metodov otbora, podgotovki i analiza prob vody, donnyh otlozhenij i beregovykh nanosov* [Microplastics in the marine environment: review of methods for sampling, preparation and analysis of water samples, bottom sediments and coastal sediments]. *Okeanologiya* [Oceanology], 2018, vol. 58, no. 1, pp. 149–157 (in Russian). **DOI:** 10.7868/S0030157418010148

4. Lenz R., Labrenz M. Small Microplastic Sampling in Water: Development of an Encapsulated Filtration Device. *Water*, 2018, vol. 10, iss. 8, p. 1055.

**DOI:** 10.3390/w10081055

5. Hildebrandt L., Voigt N., Zimmermann T., Reese A., Proefrock D. Evaluation of continuous flow centrifugation as an alternative technique to sample microplastic from water bodies. *Marine Environmental Research*, 2019, vol. 151, p. 104768.

**DOI:** 10.1016/j.marenvres.2019.104768

6. Ershova A.A., Tatarenko Yu.A. *Probootbornik dlya opredeleniya sodержaniya mikro-plastika v morskoy vode (Hydro PuMP)* [Sampler for determining the content of microplastics in seawater (Hydro PuMP)]. Patent RF, no. 206110, 2021.

7. Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R.C., Thiel M. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification. *Environ. Sci. Technol.*, 2012, vol. 46, no. 6, pp. 3060–3075. **DOI:** 10.1021/es2031505

8. Ourgaud M., Phuong N.N., Papillon L., Panagiotopoulos C., Galgani F., Schmidt N., Fauvelle V., Brach-Papa C., Sempéré R. Identification and Quantification of Microplastics in the Marine Environment Using the Laser Direct Infrared (LDIR) Technique. *Environ. Sci. Technol.*, 2022, vol. 56, no. 14, pp. 9999–10009.

**DOI:** 10.1021/acs.est.1c08870

9. Yang J., Monnot M., Sun Y., Asia L., Wong-Wah-Chung P., Doumenq P., Moulin P. Microplastics in different water samples (seawater, freshwater, and wastewater): Methodology approach for characterization using micro-FTIR spectroscopy. *Water Research*, 2023, vol. 232, no. 1, April, p. 119711. **DOI:** 10.1016/j.watres.2023.119711

10. Coldewey D. Saildrone takes the wraps off its Voyager autonomous research vessel. Tech Crunch,

March 2023. [Electronic Resource]. Available at: <https://www.saildrone.com/technology/vehicles> (accessed: 04.05.2023).

11. Alekseev V.A., Usoltsev V.P., Yuran S.I. *Ustrojstvo dlya otbora i ochenki prob zhidkosti* [Device for sampling and evaluation of liquid samples]. Patent RF, no. 2775302, 2022.

12. Schauburger V. *Energiya vody* [Water energy]. Moscow, Eksmo Publ., 2007, 320 p.

13. Zbinden R. *Infrakrasnaya spektroskopiya vysokopolimerov* [Infrared spectroscopy of high polymers]. Moscow, Mir Publ., 1966, 355 p.

14. Shyhaliev K.S. *Izuchenie mekhanizma sshivaniya i struktury sshitogo polietilena* [Study of the mechanism of crosslinking and the structure of cross-linked polyethylene]. *Evrasijskij soyuz uchenykh* [Eurasian Union of Scientists], 2018, no. 4, pp. 73–77 (in Russian).

15. *Spektry molekul i tverdykh tel. Spekr pogloshcheniya vody* [Spectra of molecules and solids. Water absorption spectrum] [Electronic Resource]. Available at: <http://www.myshared.ru/slide/644303/> (accessed: 04.05.2023) (in Russian).

16. Yuhnevich G.V. *Infrakrasnaya spektroskopiya vody* [Infrared spectroscopy of water]. Moscow, Nauka Publ., 1973, 210 p.

17. Kuptsov A.H., Zhizhin G.N. *Fur'e-KR i Fur'e-IK spektry polimerov* [Fourier-Raman and Fourier-IR spectra of polymers]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2013, 696 p.

18. Alekseev V.A., Zaripov M.R., Perminov A.S., Sitnikova E.A., Usol'tsev V.P., Yuran S.I. Increasing of Pulsed Laser Source Peak Power by Use of Ring Fiber-Optic Delay Line. *Devices and Methods of Measurements*, 2019, vol. 10, no. 2, pp. 151–159 (In Russian).

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-2-151-159

19. Alekseev V.A., Yuran S.I., Perminov A.S., Usoltsev V.P., Zaripov M.R. *Istochnik impul'snogo lazernogo izlucheniya* [Source of pulsed laser radiation]. Patent RF, no. 189439, 2019.

20. ZHukova L.V., L'vov A.E., Korsakov A.S., Salimgareev D.D., Korsakov V.S. [Domestic developments of IR optical materials based on solid solutions of silver halides and mono-valent thallium]. *Optika i spektroskopiya* [Optics and spectroscopy], 2018, vol. 125, iss. 6, pp. 763–773 (in Russian).

**DOI:** 10.21883/OS.2018.12.46936.156-18

21. Mid-Infrared (MIR) Photodiode: Electro Optical Components, Inc. [Electronic Resource]. Available at: <http://www.eoc-inc.com/> (accessed: 03.06.2023).

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-115-125

## Применение метода дифракции рентгеновских лучей для изучения напряжённого состояния поверхности металла при статическом и ударном деформировании

А.П. Крень<sup>1</sup>, М.Н. Делендик<sup>2</sup>, О.В. Мацулевич<sup>1</sup>, О.К. Гусев<sup>2</sup>, К.В. Пантелеев<sup>2</sup>, Р.И. Воробей<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Академическая, 16, г. Минск 220012, Беларусь

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

Поступила 04.05.2023

Принята к печати 07.06.2023

Изучение поля напряжений в пластическом отпечатке и вокруг него имеет большое прикладное значение. Процессы, подобные вдавливанию индентора, используются при дробеструйной обработке для упрочнения поверхности материалов и генерации сжимающих напряжений в поверхностных слоях. Целью работы являлось изучение изменения напряжённо-деформированного состояния в области пластического отпечатка при увеличении нагрузки, при переходе от малых деформаций к большим, а также изменения напряжения при различных скоростях деформации.

Методом дифракции рентгеновских лучей изучено поле остаточных напряжений, сгенерированных на поверхности пластически деформированной области – в зоне отпечатка, образующегося при вдавливании в металл сферического индентора. Проанализировано изменение распределения напряжений при увеличении нагрузки в диапазоне глубин пластического отпечатка 10–60 мкм для сталей и алюминия. Изучено влияние скорости нагружения, при нормальном контакте соударяющихся тел, на изменение значений остаточных напряжений. Показано, что распределение напряжений имеет сложный характер с областями сжатия и растяжения металла и определяется соотношением глубины отпечатка к его диаметру.

Полученные экспериментальные данные позволяют определять выбор оптимальных режимов дробеструйной обработки, в том числе для повышения предела выносливости изделий.

**Ключевые слова:** деформация, распределение механических напряжений, статическое и динамическое индентирование, дифракция рентгеновских лучей, поверхность

---

**Адрес для переписки:**

Крень А.П.

Ин-т прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Академическая, 16, г. Минск 220012, Беларусь  
e-mail: 762-33-00@gmail.com

---

**Address for correspondence:**

Kren A.P.

Institute of Applied Physics of the National Academy  
of Science of Belarus,  
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220012, Belarus  
e-mail: 762-33-00@gmail.com

---

**Для цитирования:**

А.П. Крень, М.Н. Делендик, О.В. Мацулевич, О.К. Гусев,  
К.В. Пантелеев, Р.И. Воробей.

Применение метода дифракции рентгеновских лучей для изучения  
напряжённого состояния поверхности металла при статическом  
и ударном деформировании.

Приборы и методы измерений.

2023. – Т. 14, № 2. – С. 115–125.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-115-125

---

**For citation:**

A.P. Kren, M.N. Delendik, O.V. Matsulevich, O.K. Gusev,  
K.U. Pantsialeu, R.I. Vorobey.

[X-ray Diffraction Method in the Study of a Metal Surface Stress State  
under Static and Impact Deformation].

Devices and Methods of Measurements.

2023, vol. 14, no. 2, pp. 115–125 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-115-125

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-115-125

## X-ray Diffraction Method in the Study of a Metal Surface Stress State Under Static and Impact Deformation

A.P. Kren<sup>1</sup>, M.N. Delendik<sup>2</sup>, O.V. Matsulevich<sup>1</sup>, O.K. Gusev<sup>2</sup>, K.U. Pantsialeu<sup>2</sup>,  
R.I. Vorobey<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus,  
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220012, Belarus*

<sup>2</sup>*Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus*

Received 04.05.2023

Accepted for publication 07.06.2023

### Abstract

Study of the stress field in a plastic imprint and around it is of great practical importance. Processes similar to indentation are used in shot blasting to harden the surface of materials and generate compressive stresses in the surface layers. The purpose of this work was to study the change in the stress-strain state in the area of the plastic imprint with increasing load, in the transition from small to large deformations, as well as to study the change in stress at different strain rates.

X-ray diffraction method was used to study the field of residual stresses generated on the surface of a plastically deformed region – in the zone of an imprint formed when a spherical indenter is pressed into the metal. An analysis of the change in the stress distribution with increasing load in the range of plastic imprint depths of 10–60 μm for steels and aluminum was made. Influence of the loading rate on the change in the values of residual stresses under normal contact of colliding bodies was studied. It is shown that the stress distribution has a complex character with areas of compression and tension of the metal and is determined by the ratio of the indentation depth to its diameter.

The obtained experimental data make it possible to determine the choice of optimal modes of shot blasting, including for increasing the endurance limit of products.

**Keywords:** deformation, mechanical stress distribution, static and dynamic indentation, X-ray diffraction, surface

---

#### Адрес для переписки:

Крень А.П.  
Ин-т прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Академическая, 16, г. Минск 220012, Беларусь  
e-mail: 762-33-00@gmail.com

---

#### Address for correspondence:

Kren A.P.  
Institute of Applied Physics of the National Academy  
of Science of Belarus,  
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220012, Belarus  
e-mail: 762-33-00@gmail.com

---

#### Для цитирования:

А.П. Крень, М.Н. Делендик, О.В. Мацулевич, О.К. Гусев,  
К.В. Пантелеев, Р.И. Воробей.  
Применение метода дифракции рентгеновских лучей для изучения  
напряжённого состояния поверхности металла при статическом  
и ударном деформировании.  
Приборы и методы измерений.  
2023. – Т. 14, № 2. – С. 115–125.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-115-125

---

#### For citation:

A.P. Kren, M.N. Delendik, O.V. Matsulevich, O.K. Gusev,  
K.U. Pantsialeu, R.I. Vorobey.  
[X-ray Diffraction Method in the Study of a Metal Surface Stress State  
under Static and Impact Deformation].  
Devices and Methods of Measurements.  
2023, vol. 14, no. 2, pp. 115–125 (in Russian).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-115-125

## Введение

Изучение поля напряжений в пластическом отпечатке и вокруг него имеет большое прикладное значение. Процессы, подобные вдавливанию индентора, используются при дробеструйной обработке для упрочнения поверхности материалов и генерации сжимающих напряжений в поверхностных слоях [1 2].

Это способствует повышению твёрдости и снижению риска образования трещин в изделиях. В тоже время существуют ситуации, когда аналогичное индентированию воздействие производится случайным образом, например, при многократном ударе песчаных частиц о лопасти турбин, что вызывает усталостное повреждение поверхности. При этом может наблюдаться обратное явление – при многократном циклическом приложении высокоскоростной нагрузки это может привести к разупрочнению поверхности и возникновению усталостных трещин. Кроме этого, изучение распределения напряжений в области пластического отпечатка важно при разработке методик оценки трещиностойкости с использованием статического и динамического индентирования.

В настоящее время существует ряд работ по изучению напряжённо-деформированного состояния в области пластического отпечатка. В работах [3–6] представлена обширная информация по распределению напряжений, определённых методами моделирования, а именно методом конечных элементов. Имеется ряд публикаций, в которых приведены экспериментальные сведения, полученные с помощью рентгеновских дифрактометров [7].

Однако, эти сведения являются фрагментарными. В этой связи в настоящей работе проведён ряд экспериментов, целью которых являлось изучение изменения напряжения при увеличении нагрузки, при переходе от малых деформаций к большим, а также для различных скоростей деформации (статика и динамика).

## Материалы

Для исследований были взяты образцы из углеродистой стали У8 с твёрдостью по Бринеллю 175 НВ, из стали 45 с твёрдостью 240 НВ и алюминиевого сплава Д16 с твёрдостью 42 НВ. Размеры образцов составили 120×80×18 мм, 120×80×18 мм и 70×70×20 мм соответственно.

Перед проведением измерений образцы прошли отжиг для снятия напряжений и полировались до шероховатости поверхности  $R_{a0,5}$ . После этого проводилось травление поверхности электролитом типа К1 (основной компонент – перхлорная кислота) производства QATM.

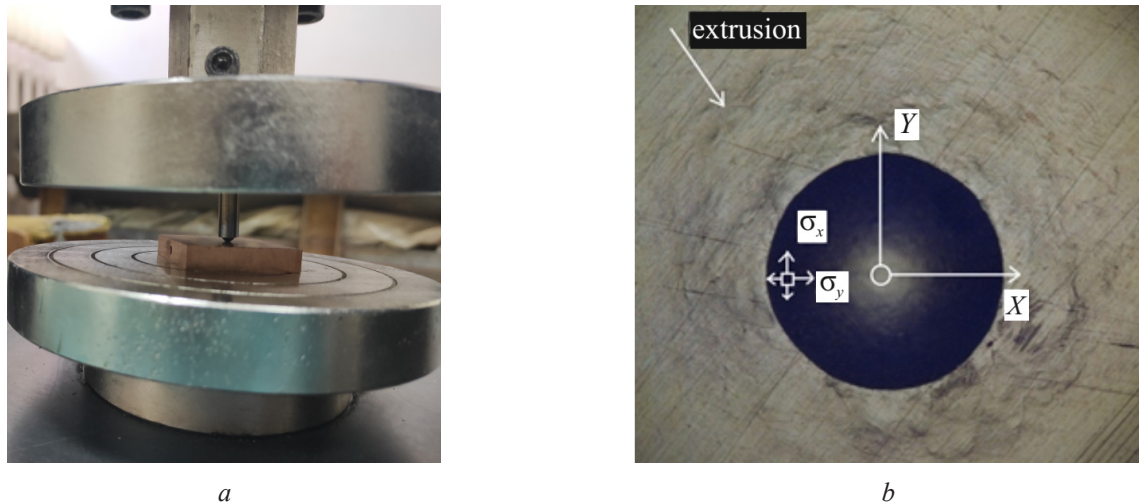
## Приборы и методы исследования

Ударное вдавливание производилось с помощью прибора ИПМ, разработанного в ИПФ НАН Беларуси. Индентор был выполнен из карбида вольфрама, диаметр сферического наконечника составлял 2,3 мм, а масса 4,3 г. Разгон индентора производился под действием силы тяжести. Прибор позволяет регистрировать полный цикл нагружения материала от начала контакта индентора с материалом до выхода из этого контакта. При этом фиксируются мгновенные значения скорости, контактного усилия и перемещения во времени. Подробное описание прибора можно найти в [8, 9].

Статическое вдавливание осуществлялось с помощью универсальной испытательной машины TIME WDW. Индентор закреплялся на одной из плит (рисунок 1а), после чего производилось нагружение. Использовались два индентора: один стандартный твердосплавной шарик диаметром  $D = 10$  мм, используемый при измерении твёрдости по Бринеллю, второй – индентор диаметром  $D = 2,3$  мм, который использовался при ударном вдавливании. При индентировании индентором диаметром  $D = 2,3$  мм нагрузка эмпирически подбиралась таким образом, чтобы глубина остаточного отпечатка примерно совпадала при ударе и статическом нагружении.

Диаметр образующегося отпечатка (рисунок 1б) регистрировался с помощью металлографического микроскопа МИ-1, производства «Оптоэлектронные системы» (Беларусь). Измерение глубины (профиля) остаточного отпечатка производилось с помощью лазерного измерителя расстояния, входящего в состав рентгеновского дифрактометра GNR STRESS X (Италия), который также использовался при оценке создаваемых остаточных напряжений на поверхности метал-ла. Технические характеристики дифрактометра представлены в таблице 1.





**Рисунок 1** – Индентирование материалов: *a* – схема нагружения; *b* – отпечаток на стали

**Figure 1** – Indentation of materials: *a* – loading scheme; *b* – imprint on steel

Таблица 1/Table 1

### Характеристики сканирования

#### Scan characteristics

| Параметры / Parameters                          | Значения / Values                                                                                     |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Роботизированный гониометр / Robotic Goniometer | Программируемый пси-скан $-45^{\circ}/+45^{\circ}$<br>Programmable Psi-Scan $-45^{\circ}/+45^{\circ}$ |
| Детектор / Detector                             | Многополосный Dectris Mythen<br>Multiband Dectris Mythen                                              |
| Плоскость / Plane                               | Сталь / Steel – {211}<br>Алюминий / Aluminum – {311}                                                  |
| Угол дифракции / Diffraction angle              | Сталь / Steel – $156^{\circ}$<br>Алюминий / Aluminum – $140^{\circ}$                                  |
| Диапазон сканирования / Scan Range              | Сталь / Steel – $152^{\circ} - 160^{\circ}$<br>Алюминий / Aluminum – $136^{\circ} - 144^{\circ}$      |
| Шаг сканирования / Scan step                    | $0,15^{\circ}$                                                                                        |
| Осцилляции / Oscillations                       | $2^{\circ}$                                                                                           |

### Результаты измерений

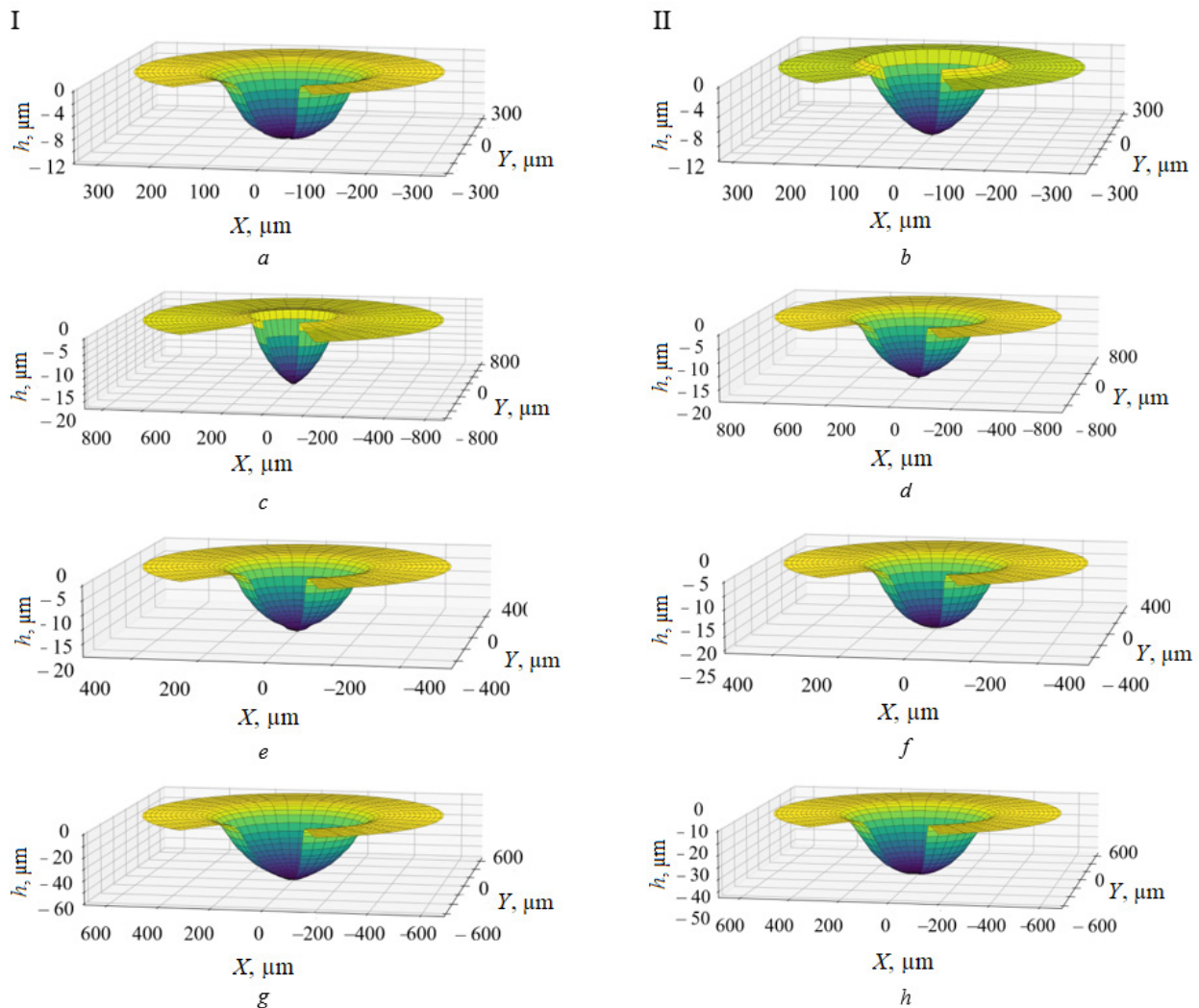
На рисунке 1*b* показаны характерные изображения отпечатков, полученные с помощью оптического микроскопа. Видно образование навала вокруг отдельных отпечатков, который можно проанализировать исходя из данных представленных на рисунке 2, где показаны объёмные профили отпечатков. Эти же отпечатки использовались в дальнейшем для анализа

формирующихся остаточных напряжений на пластически деформированной поверхности.

Как видно из рисунка 2, для ударного индентирования стали У8 характерно наличие небольшого навала по краям отпечатка (рисунки 2*c* и *d*), который практически незаметен при статическом вдавливании (рисунки 2*a* и *b*). При этом для Д16Т такой навал практически отсутствует как для динамического, так и статического индентирования (рисунки 2*e*, *f*, *g*, *h*).

При этом, отсчитываемая от исходной поверхности глубина отпечатка, образующаяся при ударе, во всех случаях меньше, чем при плавном

вдавливании индентора (при примерно равном значении контактного усилия, развиваемом при ударном и статическом индентировании).



**Рисунок 2** – Объёмный профиль отпечатков, полученных при индентировании стали У8 (*a, b, c, d*) и Д16Т (*e, f, g, h*): I – статическое индентирование; II – динамическое вдавливание

**Figure 2** – Volumetric profile of indentations obtained during indentation of steel U8 (*a, b, c, d*) and D16T (*e, f, g, h*): I – static indentation; II – dynamic indentation

Для динамического индентирования стали У8 развиваемое усилие  $P$  составило 18 и 34 Н, при этом образовался пластический отпечаток глубиной  $h$  10 и 19 мкм (рисунок 2*b, d*), для статического – усилие 15 и 30 Н (рисунок 2*a, b*), глубина отпечатка 12 и 22 мкм соответственно. При ударном вдавливании сферического индентора в алюминиевый сплав величина  $P$  была 9 и 18 Н, а  $h$  – 25,5 и 54 мкм (рисунок 2*f, h*), для статического:  $P$  – 8 и 19 Н (рисунок 2*a, b*),  $h$  – 24 и 60 мкм соответственно (рисунок 3*e, g*).

Используя эти и другие параметры отпечатка, представленные в таблице 2, можно рассчитать твёрдость материала по шкале Бринелля.

Как видно из таблицы 2 для стали У8 динамическая твердость превышает статическую в  $\approx 1,4$  раза, что соответствует известным данным, как и тот факт, что для алюминия статическая и динамическая твёрдость практически совпадают. Кроме этого, измеренная твёрдость соответствует значениям, полученным при макроиспытаниях. Как было сказано ранее, она составляет 175 единиц для стали и 42 единицы

для алюминиевого сплава. Это подтверждает верность выполненных геометрических измерений при определении параметров отпечатков.

Таблица 2/Table 2

### Основные параметры отпечатков и расчётная твёрдость материала по шкале Бринелля

#### The main parameters of the prints and the calculated hardness of the material on the Brinell scale

| Материал<br>Material | Динамическое индентирование<br>Dynamic indentation |           |           | Статическое индентирование<br>Static indentation |           |           |
|----------------------|----------------------------------------------------|-----------|-----------|--------------------------------------------------|-----------|-----------|
|                      | $P$ , Н                                            | $d$ , мкм | $HB$ , ед | $P$ , Н                                          | $d$ , мкм | $HB$ , ед |
| Сталь У8             | 18                                                 | 310       | 237       | 15                                               | 330       | 174       |
| Steel U8             | 34                                                 | 416       | 248       | 30                                               | 448       | 188       |
| Сплав Д16            | 9                                                  | 500       | 45        | 8                                                | 490       | 42        |
| Alloy D16            | 18                                                 | 704       | 46        | 19                                               | 760       | 41        |

Измерение остаточных напряжений проводилось вдоль оси  $X$  и  $Y$  (рисунок 2) по диаметру отпечатка. Использовалась методика, изложенная в европейском стандарте *EN 15305:2008 «Non-destructive Testing – Test Method for Residual Stress analysis by X-ray Diffraction»*. Режим измерения –  $w$ , энергия излучения – 30 кэВ, при которой глубина проникновения в материал оставляла примерно 15 мкм. Измерения проводились при углах от  $-45^\circ$  до  $+45^\circ$ , при осцилляциях  $\pm 2^\circ$ . Пример дифракционного пика, полученного внутри отпечатка и в месте, не подвергнутому деформации, показан на рисунке 3.

На рисунках 4 и 5 показан характер изменения напряжений вдоль оси  $x$  и  $y$  –  $\sigma_{xx}$  и  $\sigma_{yy}$ . На рисунке 6 и 7 показано изменение напряжений относительно профиля поверхности отпечатка.

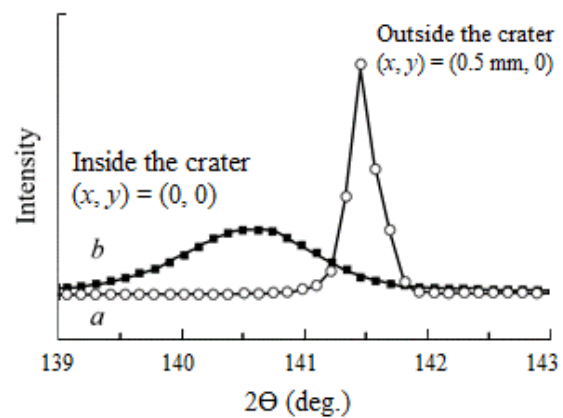
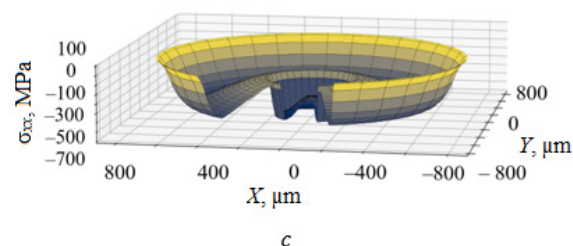
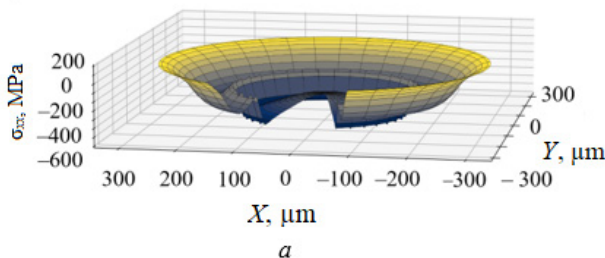


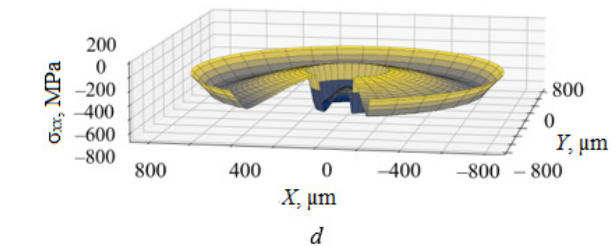
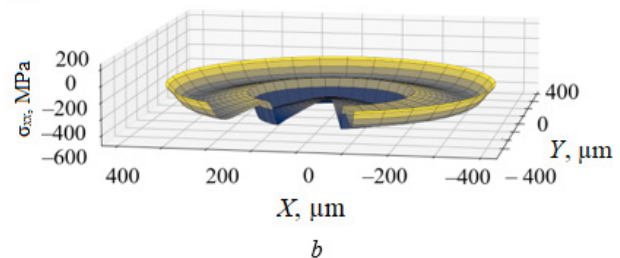
Рисунок 3 – Пример дифракционного пика в различных точках образца:  $a$  – в отпечатке;  $b$  – вне отпечатка

Figure 3 – An example of a diffraction peak at different points of the sample:  $a$  – in the imprint;  $b$  – outside the imprint

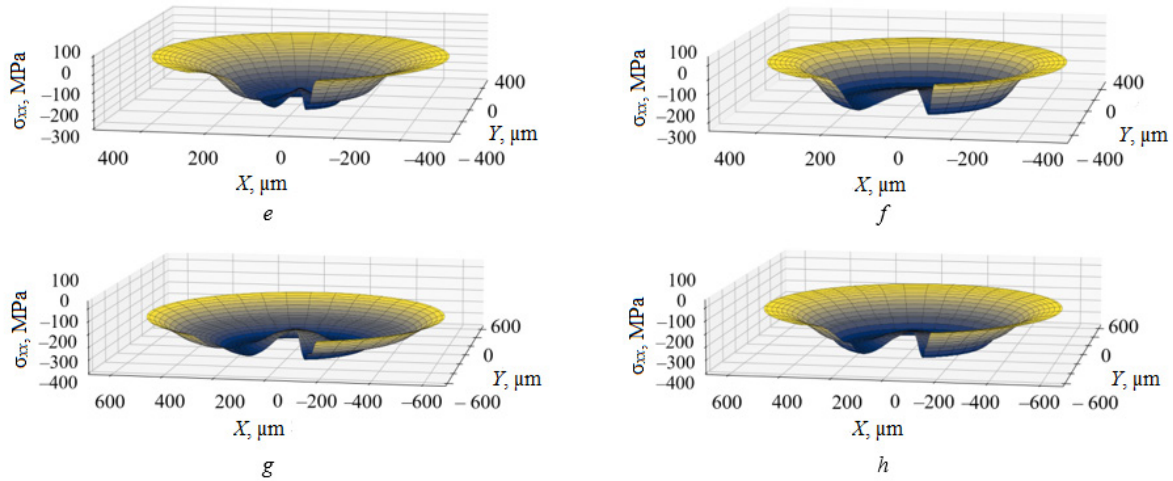
I



II

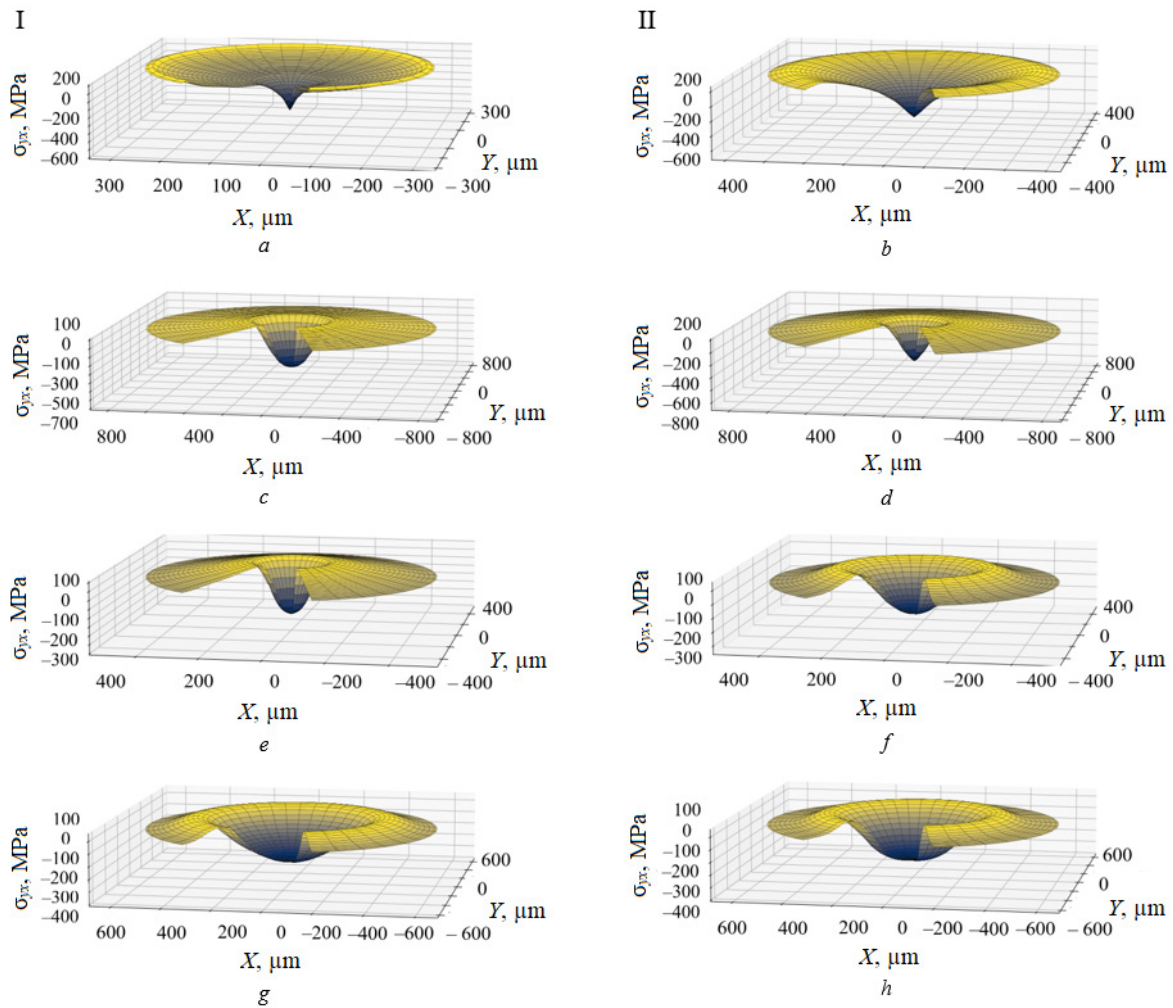






**Рисунок 4** – Измеренное с помощью дифрактометра распределение  $\sigma_{xx}$  в отпечатках, полученных при индентировании стали ( $a, b, c, d$ ) и алюминия ( $e, f, g, h$ ): I – статическое индентирование; II – динамическое вдавливание

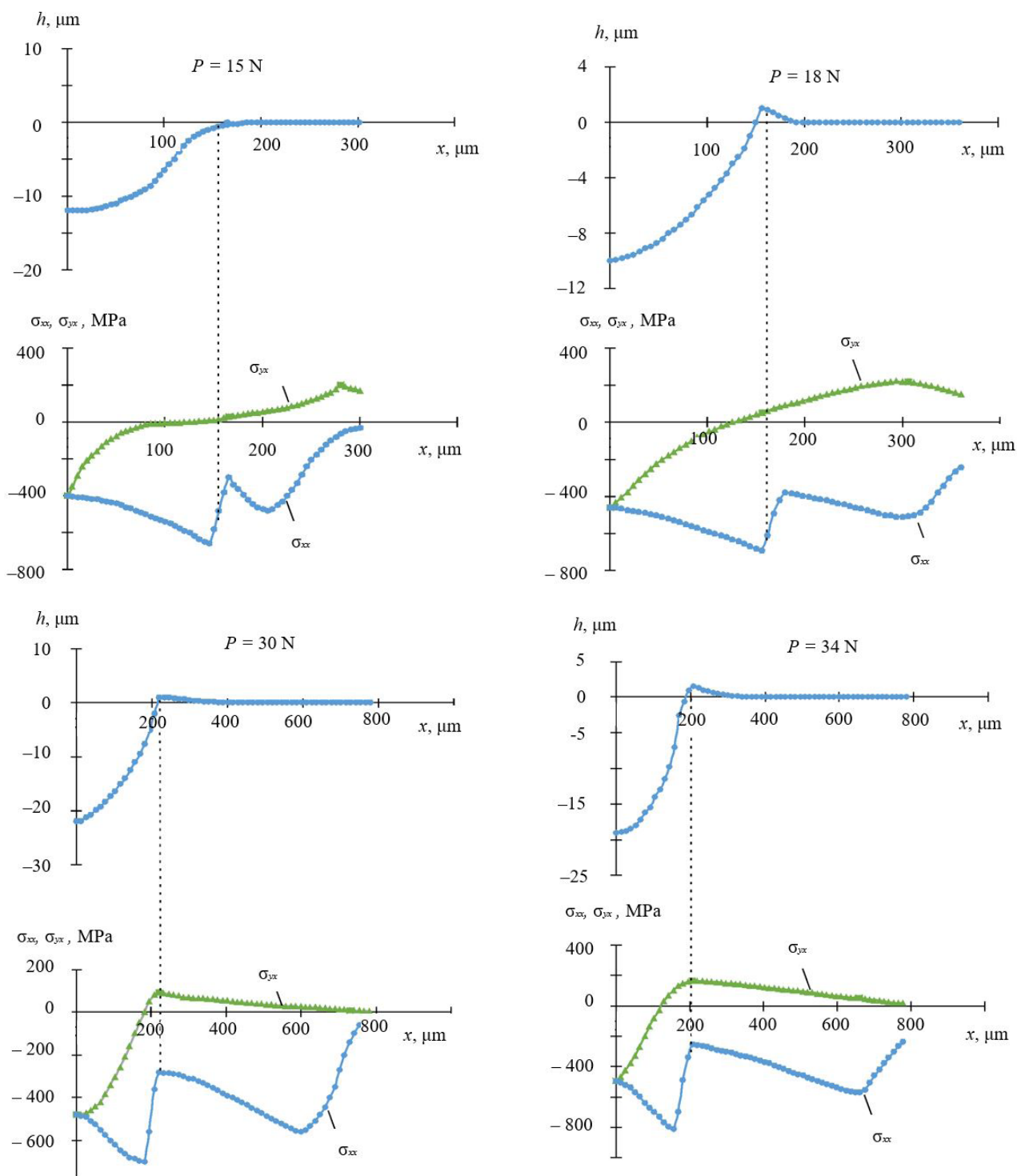
**Figure 4** – Distribution of  $\sigma_{xx}$  measured using a diffractometer in prints obtained by indenting steel ( $a, b, c, d$ ) and aluminum ( $e, f, g, h$ ): I – static indentation; II – dynamic indentation



**Рисунок 5** – Измеренное с помощью дифрактометра распределение  $\sigma_{yx}$  в отпечатках, полученных при индентировании стали ( $a, b, c, d$ ) и алюминия ( $e, f, g, h$ ): I – статическое индентирование; II – динамическое вдавливание

**Figure 5** – Distribution of  $\sigma_{yx}$  measured using a diffractometer in indentations obtained by indenting steel ( $a, b, c, d$ ) and aluminum ( $e, f, g, h$ ): I – static indentation; II – dynamic indentation



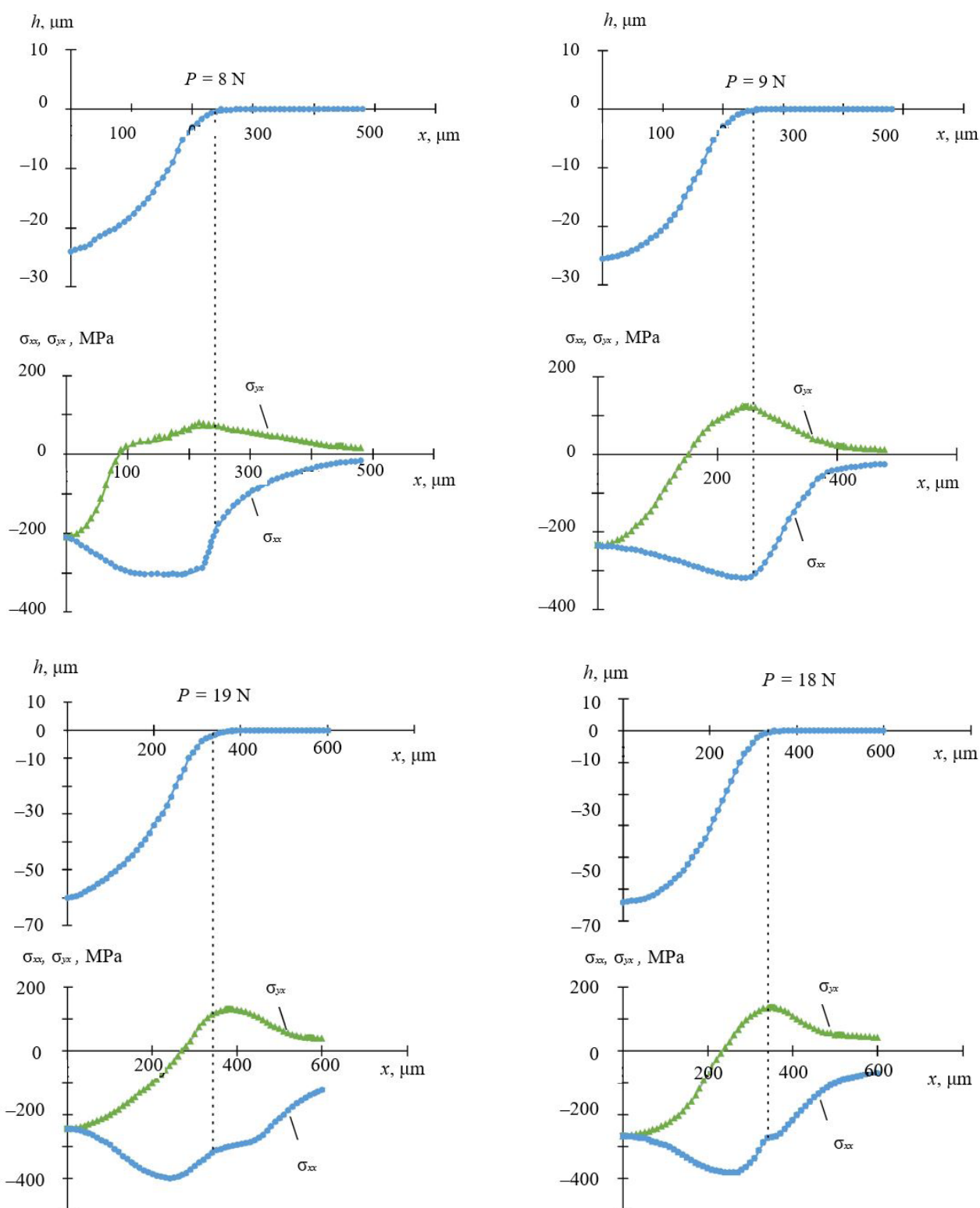


**Рисунок 6** – Профиль отпечатка и распределение напряжений для стали У8: *a* – статическое вдавливание; *b* – ударное индентирование

**Figure 6** – Indentation profile and stress distribution for steel U8: *a* – static indentation; *b* – impact indentation

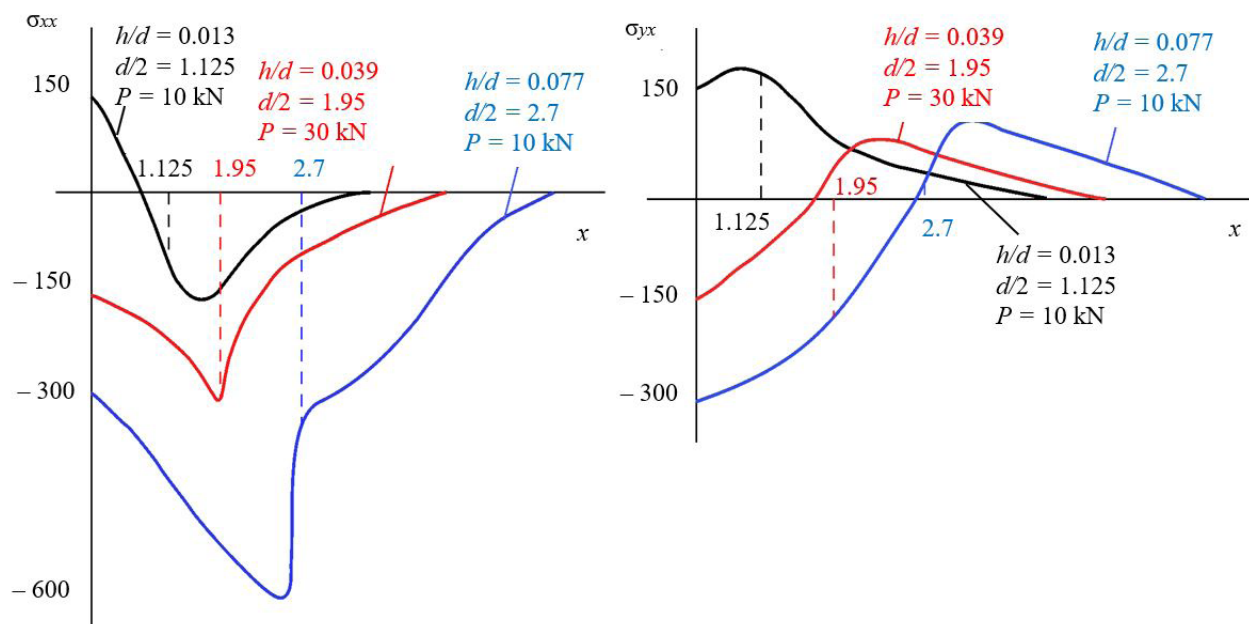
Во всех случаях, представленных на рисунках 6 и 7, соотношение глубины отпечатка к его диаметру  $h/d$  находится в диапазоне 0,032–0,078. В этой связи были выполнены эксперименты по изучению изменения

напряжений при более низких нагрузках. Как видно из рисунка 8, где представлен профиль  $\sigma_{xx}$  и  $\sigma_{yx}$ , при уменьшении соотношения  $h/d$  напряжения в отпечатке становятся растягивающими.



**Рисунок 7** – Профиль отпечатка и распределение напряжений для Д16Т:  $a$  – статическое вдавливание;  $b$  – ударное индентирование

**Figure 7** – Indentation profile and stress distribution for D16T:  $a$  – static indentation;  $b$  – impact indentation



**Рисунок 8** – Распределение напряжений на поверхности отпечатка в зависимости от соотношения  $h/d$  для стали 45 при статическом индентировании индентором диаметром 10 мм

**Figure 8** – Distribution of stresses on the imprint surface, depending on the ratio  $h/d$  for steel 45 during static indentation with an indenter having diameter of 10 mm

Этот факт, очевидно, необходимо учитывать при выборе параметров дробеструйной обработки, поскольку растягивающие напряжения могут вызвать растрескивание поверхности материала, так же как и наличие окружных растягивающих напряжений на краях отпечатка. Можно предположить, что переход напряжений от сжимающих к растягивающим происходит в диапазоне  $h/d \approx 0,025\text{--}0,018$ .

## Заключение

Рассмотрен механизм формирования остаточных напряжений на поверхности пластического отпечатка и в прилегающей к нему зоне при однократном нагружении материала. Показано, что при статическом и динамическом (со скоростью деформации до  $10^3 \text{ с}^{-1}$ ) приложении нагрузки величина напряжений при условии создания примерно равных деформаций практически совпадает.

Наблюдается достаточно сложный характер изменения напряжений: при соотношении глубины  $h$  пластического отпечатка к его диаметру  $d$  более 0,025 радиальные напряжения в отпечатке и за его пределами являются сжимающими с резким изменением на краях

отпечатка, окружные напряжения внутри отпечатка преимущественно сжимающие и переходят в растягивающие на его краях.

При  $h/d < 0,025$  радиальные напряжения в центре отпечатка переходят в растягивающие, а осевые являются растягивающими как в отпечатке так и за его пределами.

Получение данных соотношений играет большую роль для выбора оптимальных режимов дробеструйной обработки и повышения предела выносливости изделий.

## References

1. Kobayashi M., Matsui T., Murakami Y. Mechanism of creation of compressive residual stress by shot peening. *International Journal of Fatigue*, 1998, vol. 20, no. 5, pp. 351–357.
2. Goulmy J.P., Boyer V., Retraint D., Kanoute P., Toulbi L., Rouhaud E. Modeling of the shot peening of a nickel alloy with the consideration of both residual stresses and work hardening. *International Journal of Solids and Structures*, 2023, vol. 264, p. 112120.  
DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2023.112120
3. Mahmoudi A.H., Ghasemi A., Farrahi G.H., Sherafatnia K. A comprehensive experimental and numerical study on redistribution of residual stresses by shot peening. *Materials & Design*, 2016, vol. 90, pp. 478–487.  
DOI: 10.1016/j.matdes.2015.10.162

4. Feng G., Qu S., Huang Y., Nix W.D. An analytical expression for the stress field around an elastoplastic indentation/contact. *Acta Materialia*, 2007, vol. 55, iss. 9, pp. 2929–2938.

**DOI:** 10.1016/j.actamat.2006.12.030

5. Gang Feng, Shaoxing Qu, Yonggang Huang, William D. Nix. A quantitative analysis for the stress field around an elastoplastic indentation/contact. *Journal of Materials Research*, 2009, vol. 24, iss. 3, pp. 704–718.

**DOI:** 10.1557/jmr.2009.0097

6. Munawar Chaudhri M. Subsurface plastic strain distribution around spherical indentations in metals. *Philosophical Magazine A*, 1996, vol. 74, iss. 5, pp. 1213–1224.

**DOI:** 10.1080/01418619608239721

7. Boyce B.L., Chen X., Hutchinson J.W., Ritchie R.O. The residual stress state due to a spherical hard-body impact. *Mechanics of Materials*, 2001, vol. 33, iss. 8, pp. 441–454. **DOI:** 10.1016/S0167-6636(01)00064-3

8. Kren A., Delendik M., Machikhin A. Non-destructive evaluation of metal plasticity using a single impact microindentation. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, vol. 162, p. 104141.

**DOI:** 10.1016/j.ijimpeng.2021.104141

9. Kren A., Machikhin A., Marchenkov A. Impact indentation of metals in the transition region from the elastic to plastic state. *Journal of Materials Science*, 2023, vol. 58(2), pp. 961–970.

**DOI:** 10.1007/s10853-022-08122-7



DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-126-134

## Анализ состояния электрических машин путём измерения межвиткового сопротивления в его обмотках

А.В. Исаев, Ю.В. Суходолов, К.А. Любинский, А.И. Голубович

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

Поступила 07.04.2023

Принята к печати 29.05.2023

Применяемые в промышленности методы диагностики не позволяют проконтролировать состояние обмоток электрических машин в рабочем состоянии и зафиксировать дефектообразование в них на ранних стадиях развития. Целью работы являлась разработка метода и построение прибора, позволяющего проводить измерение межвитковых сопротивлений в обмотках электрических машин, в том числе без изъятия его из технологического процесса, и тем самым проводить оценку текущей и дальнейшей работоспособности.

Разработана структурная схема прибора для измерения межвитковых сопротивлений в обмотках электрических машин, описан метод и построен алгоритм проведения диагностических процедур. Также в результате исследования определены математические зависимости, характеризующие основные операции, выполняемые устройством, и разработана математическая модель получения значения межвиткового сопротивления в диагностируемых обмотках по значению измеренной разности фаз для асинхронного двигателя АИР63В4У3.

Разработанный метод и прибор на его основе позволяют проводить измерение межвитковых сопротивлений в обмотках электрических машин, в том числе без изъятия его из технологического процесса, и фиксировать дефектообразование на ранних стадиях развития, и тем самым оценивать в режиме реального времени его текущую и дальнейшую работоспособность.

**Ключевые слова:** диагностика обмоток электрических машин, межвитковое сопротивление, способ измерения межвитковых сопротивлений в обмотках, прибор для измерения межвитковых сопротивлений

---

**Адрес для переписки:**

Исаев А.В.

Белорусский национальный технический университет,  
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь  
e-mail: isaevav@bntu.by

---

**Address for correspondence:**

Isaev A.V.

Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosti Ave., 65, Minsk 220013, Belarus  
e-mail: isaevav@bntu.by

---

**Для цитирования:**

А.В. Исаев, Ю.В. Суходолов, К.А. Любинский, А.И. Голубович.  
Анализ состояния электрических машин путём измерения  
межвиткового сопротивления в его обмотках.

Приборы и методы измерений.  
2023. – Т. 14, № 2. – С. 126–134.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-126-134

---

**For citation:**

A.V. Isaev, U.V. Suchodolov, K.A. Lyubinsky, A.I. Golubovich.  
[Analysis of Electrical Machines' State by Measuring  
the Interturn Resistance in Its Windings].

Devices and Methods of Measurements.  
2023, vol. 14, no. 2, pp. 126–134 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-126-134

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-126-134

## Analysis of Electrical Machines' State by Measuring the Interturn Resistance in Its Windings

A.V. Isaev, U.V. Suchodolov, K.A. Lyubinsky, A.I. Golubovich

Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosti Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

Received 07.04.2023

Accepted for publication 29.05.2023

### Abstract

Diagnostic methods applied in the industry do not allow to control the state of electrical machines windings in working condition and to fix the defect formation in them at the early stages of development. The aim of the work was to develop a method and construct a device that allows measuring interturn resistances in the electrical machines' windings without the need to remove it from the technological process, and thereby assess its current and future performance.

A block diagram of a device for measuring of interturn resistances in the electrical machines' windings has been developed, a method has been described, and an algorithm for carrying out diagnostic procedures has been developed. Also, as a result of the study, mathematical dependencies were determined that characterize the main operations performed by the device and a mathematical model was developed for obtaining of the interturn resistance value in the diagnosed windings from the value of the measured phase difference for the AIR63V4U3 asynchronous motor.

The developed method and a device based on it allow measuring interturn resistances in the electrical machines' windings without the need to remove it from the technological process and fix the beginning of defect formation, and, thereby, evaluate its current and future performance in real time.

**Keywords:** diagnostics of windings of electrical machines, interturn resistance, method for measuring interturn resistance in windings, device for measuring interturn resistance

---

### Адрес для переписки:

Исаев А.В.

Белорусский национальный технический университет,  
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь  
e-mail: isaevav@bntu.by

### Для цитирования:

А.В. Исаев, Ю.В. Суходолов, К.А. Любинский, А.И. Голубович.  
Анализ состояния электрических машин путём измерения  
межвиткового сопротивления в его обмотках.  
Приборы и методы измерений.  
2023. – Т. 14, № 2. – С. 126–134.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-126-134

---

### Address for correspondence:

Isaev A.V.

Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosti Ave., 65, Minsk 220013, Belarus  
e-mail: isaevav@bntu.by

### For citation:

A.V. Isaev, U.V. Suchodolov, K.A. Lyubinsky, A.I. Golubovich.  
[Analysis of Electrical Machines' State by Measuring  
the Interturn Resistance in Its Windings].  
Devices and Methods of Measurements.  
2023, vol. 14, no. 2, pp. 126–134 (in Russian).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-126-134

---

## Введение

Современное развитие электроники в области приборо- и станкостроения привело к необходимости разработки качественной и своевременной диагностики состояния электрических машин. При этом наиболее существенная проблема состоит в диагностике состояния обмоток статора, на неисправность которых может выпадать до 80 % от всех причин, определяющих их работоспособность [1, 2, 3].

Однако существующие методы диагностики электрических машин чаще всего только констатируют факт выхода её из строя и не позволяют хотя бы в минимальных пределах определять дальнейшую жизнеспособность и остаточный ресурс диагностируемого оборудования [4]. Дополнительно представленные в промышленности методы контроля и диагностики состояния электрических машин имеют ряд особенностей, которые ещё больше ограничивают сферу их применения. А именно: применение сложного диагностического оборудования и алгоритмов исследования состояния требует высокой квалификации обслуживающего персонала и больших временных затрат на организацию диагностических процедур. Следовательно, такие методы контроля состояния электрических машин малоприменимы в современных реалиях и совсем не подходят для контроля их состояния в режиме реального времени, в том числе непосредственно в рабочем режиме технологического процесса.

Математические модели, построенные на основе статистических данных по выходу из строя электрических машин [5], также не дают никакой гарантии о своевременном обнаружении развивающихся дефектов и, следовательно, мало применимы в реальных условиях работы технологического оборудования. Поэтому, максимально актуальной является разработка метода и построение системы, позволяющих в режиме реального времени отслеживать состояние диагностируемой электрической машины с оценкой не только текущего состояния, но и фиксировать начало дефектообразования и прогнозировать её дальнейшую работоспособность [1, 3]. Одним из таких способов может являться контроль и измерение сопротивления межвитковой

изоляции в обмотках диагностируемой электрической машины.

Согласно [6] электрическую машину можно представить в виде эквивалентной электрической схемы, состоящей из набора активных и реактивных элементов, организующих электромагнитный контур и обладающих резонансными явлениями на определённых частотах. Следовательно, контролируя уровень резонансных явлений, протекающих в двух сравниваемых обмотках одной электрической машины (например, путём вычитания результирующих сигналов каждой обмотки), можно на достаточно высоком уровне судить о состоянии самих обмоток.

В настоящее время такой подход к контролю состояния обмоток электрических машин (ЭМ) реализуется в нескольких направлениях, которые условно можно разделить на два, основами которых являются типы используемого диагностического сигнала: гармонический или импульсный.

Так, представлены способы, где в качестве диагностического сигнала используются синусоидальные сигналы, которые по соответствующей схеме подаются на обмотки контролируемой ЭМ. Например, способ комплексного контроля фазных обмоток ЭМ [7, 8], при котором подают основное и дополнительное напряжение на фазные обмотки контролируемой электрической машины, снимают напряжение с выводов фазных обмоток, измеряют параметр снимаемых напряжений, находят их частотный максимум, и, проведя несколько контрольных операций, определяют дефект по превышению величины измеренного параметра над установленной величиной для исправной обмотки. Этот способ обладает рядом недостатков: ограниченная область применения, так как невозможно провести контроль электрических машин с внутренним соединением фаз обмоток в звезду и без наличия четвёртого (нулевого) вывода; форма высокого напряжения, подаваемого на обмотки электрической машины, существенно отличается от синусоидального, что приводит к большой погрешности результатов диагностики.

Известны способы комплексного контроля фазных обмоток трёхфазной ЭМ [9, 10], при которых в качестве параметра снимаемых напряжений измеряют абсолютное значение

разности фаз напряжений, дополнительное напряжение подают после основного с частотой, составляющей 90 % от частоты максимума абсолютного значения измеренной разности фаз, величиной выше, чем основное напряжение и достаточной для достоверного заключения о бездефектности витковой изоляции. Основной недостаток – малая достоверность контроля из-за одновременного использования двух источников напряжения (основного и дополнительного), обладающих различием в частотных характеристиках и внутренних сопротивлениях, вызванных несовпадением параметров реализованных блоков.

В определённой мере эти недостатки компенсируются применением в качестве диагностических сигналов импульсных последовательностей. Например, известен способ комплексного контроля трёхфазной обмотки ЭМ, основанный на подаче последовательностей из разнополярных [11] и однополярных [12] импульсов напряжения в виде групп на выводы обмотки, две фазы которой включают как плечи измерительного активно-индуктивного моста. При этом, путём изменения длительности импульсов и времени задержки между ними в создаваемой последовательности, совмещают участок её спектра с низкочастотным участком частотной характеристики обмотки и определяют наличие замыкания по величине разности фаз гармоник, выделенных из сигналов, снятых с плеч моста. Однако, этим способом присущи свои недостатки: высокая погрешность (из-за использования двух избирательных блоков, обладающих различием в частотных характеристиках и внутренних сопротивлениях, вызванных различием параметров каскадов на основе операционных усилителей, на которых реализованы эти избирательные устройства; использование разнополярных импульсов приводит к дополнительной погрешности из-за их неизбежной асимметрии импульсов и разброса параметров и дополнительно ограничивает возможность цифровой реализации измерительного процесса); низкая помехозащищённость из-за трудности выделения необходимой спектральной составляющей при наличии близко лежащих соседних спектральных составляющих и низкая чувствительность к влиянию межвитковых замыканий на выделяемые для анализа сигнал, так как

анализ параметров спектра выполняется на дорезонансных частотах, что в свою очередь приводит к повышенному влиянию помех.

Целью данной работы являлась разработка метода и построение прибора, позволяющего проводить измерение межвитковых сопротивлений в обмотках электрических машин, в том числе без необходимости удаления его из технологического процесса, и тем самым проводить оценку его текущей и дальнейшей работоспособности путем фиксирования начала дефектообразования в них.

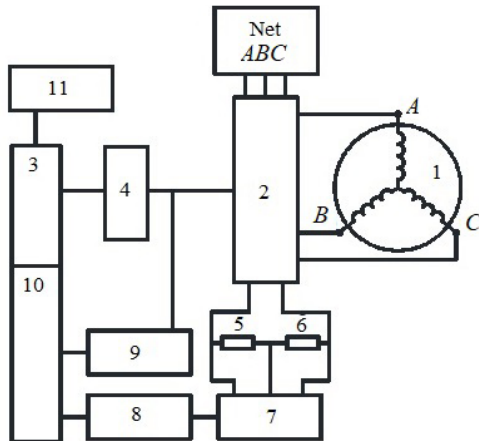
### Основная часть

Одним из способов решения задачи по созданию системы измерения межвитковых сопротивлений в обмотках ЭМ является объединение достоинств представленных методов с максимальным исключением недостатков, присущих им. Для этого в качестве испытательного сигнала используем импульсную последовательность, временные параметры которой будут определять параметры спектральных составляющих, необходимых для выполнения диагностических процедур. Кроме этого, дополнительно уменьшим погрешности, присущие подобным методам контроля, путём использования в цепи анализа информативного сигнала только одного избирательного блока. По результатам исследования разработано устройство для измерения межвитковых сопротивлений в обмотках трёхфазных асинхронных электрических двигателях со всыпной обмоткой, структурная схема которого представлена на рисунке 1.

Система для измерения межвитковых сопротивлений в обмотках электродвигателей работает следующим образом. К одной из обмоток ЭМ 1 с помощью блока переключателей (коммутаторов) 2 подключают систему формирования испытательного сигнала 3, являющегося частью микропроцессорного устройства и преобразованного в блоке усиления 4. При этом выходы оставшихся двух других обмоток подключают к измерительным резисторам 5 и 6, сигнал с которых подают на смеситель сигналов 7. Полученный результирующий сигнал подают на вход избирательного устройства суммы снимаемых сигналов 8, выход которого подключают к одному из



измерительных входов измерительной части микропроцессорного устройства 10. На второй вход измерительной системы подключают выход избирательного устройства испытательного сигнала 9, вход которого, в свою очередь, подключают к выходу системы формирования исходного испытательного сигнала. Также в системе реализован блок индикации 11, отображающий текущее состояние работы устройства и результаты диагностики электрической машины.



**Рисунок 1** – Структурная схема устройства измерения межвитковых сопротивлений в обмотках трёхфазных электрических двигателей

**Figure 1** – Structural scheme of the system for measuring of interturn resistance in the windings of three-phase electric motors

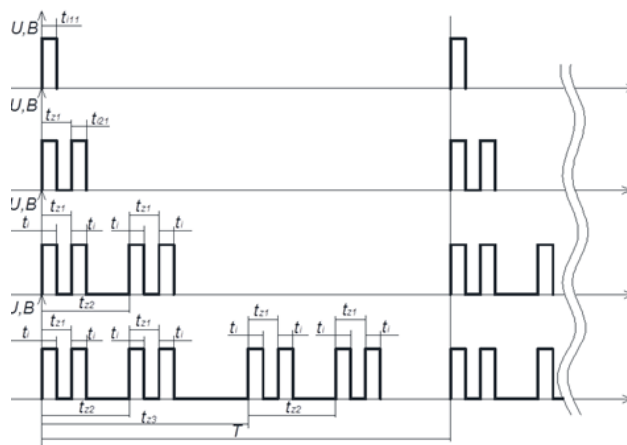
Работа устройства заключается в следующем. Генератор испытательного напряжения, реализованный на микропроцессорном устройстве, формирует последовательность групп импульсов положительной полярности с устанавливаемыми параметрами длительности импульсов  $t_i$  и временами задержки между ними  $t_{z1}$ ,  $t_{z2}$ ,  $t_{z3}$  и т.д., (рисунок 2) [13].

Для этого выбираются длительности импульсов и времена задержки таким образом, чтобы выполнялось следующее условие:  $n_{0t_i} = N \cdot T / t_i$  для самой дальней спектральной составляющей, имеющей максимальный спектр относительно выделяемой, и подавляемая длительностью первого импульса (рисунок 3 кривая 1).

После формирования первого импульса через время, определяемое условием:

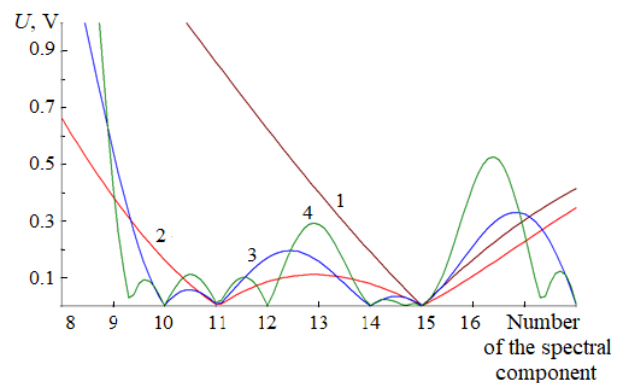
$$n_{0t_{z1}} = N \cdot T / 2t_{z1}$$

формируется второй импульс, идентичный первому, для самой дальней спектральной составляющей, имеющий минимальный спектр относительно выделяемой (рисунок 3 кривая 2).



**Рисунок 2** – Построение импульсной последовательности для выделения информативной спектральной составляющей

**Figure 2** – Construction of a pulse sequence to highlight the informative spectral component



**Рисунок 3** – Амплитудно-частотные спектры сигналов при формировании испытательной импульсной последовательности: 1 – для одиночного импульса; 2 – двух повторяющихся импульсов; 3 – комбинации двух двойных повторяющихся импульсов; 4 – результирующего сигнала из восьми импульсов

**Figure 3** – Amplitude-frequency spectra of signals in the formation of the test pulse sequence: 1 – for single pulse; 2 – two repetitive pulses; 3 – combinations of two double repetitive pulses; 4 – the resulting signal of eight pulses

Далее, для подавления следующей спектральной составляющей, формируется импульсная группа из двух импульсов, которую повторяют через время задержки, для

$n_{0_{z1}} = N \cdot T / 2t_{z1}$  которой выполняется условие для спектральной составляющей, расположенной между выделяемой и предыдущей подавленной составляющей с максимальным номером спектра (рисунок 3 кривая 3).

Следующая спектральная составляющая подавляется путём формирования следующей импульсной группы из четырёх импульсов, которую повторяют через очередное время задержки, уже определяющее ноль спектральной составляющей, расположенной между выделяемой и предыдущей подавленной с минимальным номером спектра (рисунок 3 кривая 4).

В результате этих действий компоненты указанных спектров принимают значения нуля, при этом для остальных компонент их амплитуды в результирующем испытательном сигнале ( $u_{gn}$ ) можно представить в виде уравнения (1) и влияние искажений от помех на полезный сигнал будет минимально:

$$u_{gn} = U_{gn} \sin(n\omega t + \varphi_n), \quad (1)$$

где  $U_{gn}$  – значение амплитуды сигнала генератора при выделении в нём составляющей спектра, содержащего полезную информацию;  $n$  – значение номера каждой спектральной

составляющей, которая содержит полезную информацию;  $\omega$  – значение частоты, создаваемой генератором сигнала;  $\varphi_n$  – значение фазы сигнала генератора при выделении в нём составляющей спектра, содержащего полезную информацию.

Например, на обмотку  $A$  электрической машины 1 подадим последовательность импульсов, которую мы получили. Вместе с этим с обмоток  $B$  и  $C$  будем снимать с помощью резисторов 3, 4 сигналы (уравнения 2, 3):

$$\begin{aligned} a_1(t) &= \sum_{n=1}^k U_{mn1} \sin(n\omega t + \psi_{n1}); \\ a_2(t) &= \sum_{n=1}^k U_{mn2} \sin(n\omega t + \psi_{n2}) \end{aligned} \quad (2)$$

или в векторной форме:

$$\begin{aligned} \dot{A}_1 &= \sum_{n=1}^k (U_{mn1} \cos \psi_{n1} + jU_{mn1} \sin \psi_{n1}); \\ \dot{A}_2 &= \sum_{n=1}^k (U_{mn2} \cos \psi_{n2} + jU_{mn2} \sin \psi_{n2}). \end{aligned} \quad (3)$$

Далее полученный комплекс спектральных составляющих суммируется в смесителе 5. Из полученной комбинации, содержащей набор спектральных составляющих, каждая из которых имеет свой сдвиг фаз, с помощью избирательного устройства 6 выделяют одну информативную спектральную составляющую, уравнение которой имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{A}_{inf} &= \dot{A}_{inf1} + \dot{A}_{inf2} = \\ &= (U_{m1inf} \cos \psi_{1inf} + jU_{m1inf} \sin \psi_{1inf}) + (U_{m2inf} \cos \psi_{2inf} + jU_{m2inf} \sin \psi_{2inf}) = \\ &= (U_{m1inf} \cos \psi_{1inf} + U_{m2inf} \cos \psi_{2inf}) + j(U_{m1inf} \sin \psi_{1inf} + U_{m2inf} \sin \psi_{2inf}) = \\ &= \sqrt{(U_{m1inf} \cos \psi_{1inf} + U_{m2inf} \cos \psi_{2inf})^2 + (U_{m1inf} \sin \psi_{1inf} + U_{m2inf} \sin \psi_{2inf})^2} \times e^{j \arctg \frac{U_{m1inf} \sin \psi_{1inf} + U_{m2inf} \sin \psi_{2inf}}{U_{m1inf} \cos \psi_{1inf} + U_{m2inf} \cos \psi_{2inf}}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Откуда амплитуда результирующего сигнала определяется зависимостью:

$$\begin{aligned} &= \sqrt{(U_{m1inf}^2 + U_{m2inf}^2 + 2U_{m1inf}U_{m2inf}(\cos \psi_{1inf} \cos \psi_{2inf} + \sin \psi_{1inf} \sin \psi_{2inf}))} = \\ &= \sqrt{(U_{m1inf}^2 + U_{m2inf}^2 + 2U_{m1inf}U_{m2inf} \cos(\psi_{1inf} - \psi_{2inf})).} \end{aligned} \quad (5)$$

Рассмотрим фазу полученного сигнала. Учитывая, что амплитуда сигналов, полученных с двух плеч, не существенно зависит от уровня

дефекта обмотки, можно сделать допущение:

$$U_{m1inf} = U_{m2inf} = U_{minf}. \quad (6)$$

Следовательно, фаза результирующего сигнала:

$$\begin{aligned} \frac{U_{m1inf} \sin \psi_{1inf} + U_{m2inf} \sin \psi_{2inf}}{U_{m1inf} \cos \psi_{1inf} + U_{m2inf} \cos \psi_{2inf}} &= \frac{U_{minf} (\sin \psi_{1inf} + \sin \psi_{2inf})}{U_{minf} (\cos \psi_{1inf} + \cos \psi_{2inf})} = \frac{\sin \psi_{1inf} + \sin \psi_{2inf}}{\cos \psi_{1inf} + \cos \psi_{2inf}} = \\ &= \frac{2 \sin \frac{\psi_{1inf} + \psi_{2inf}}{2}}{2 \cos \frac{\psi_{1inf} + \psi_{2inf}}{2}} = \operatorname{tg} \frac{\psi_{1inf} + \psi_{2inf}}{2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Или полное уравнение информативной спектральной составляющей имеет вид:

$$\dot{A}_{\text{inf}} = \sqrt{U_{m1\text{inf}}^2 + U_{m2\text{inf}}^2 + 2U_{m1\text{inf}}U_{m2\text{inf}}(\cos(\psi_{1\text{inf}} - \psi_{2\text{inf}}) \cdot e^{\frac{\psi_{1\text{inf}} + \psi_{2\text{inf}}}{2}}}, \quad (8)$$

где:

$$\psi_{1\text{inf}} = \psi_g + \Delta\varphi_1 \quad \text{и} \quad \psi_{2\text{inf}} = \psi_g + \Delta\varphi_2, \quad (9)$$

где  $\varphi_n$  – фаза необходимой спектральной составляющей подаваемого с генератора напряжения;  $\Delta\varphi_{n1}$  – изменение фазы исследуемой спектральной составляющей, определяемой добротностью контура катушки первой обмотки;  $\Delta\varphi_{n2}$  – изменение фазы исследуемой спектральной составляющей, определяемой добротностью контура катушки второй обмотки.

Полученный сигнал подают на фазовый детектор 8, на второй вход которого подают выделенную на избирательном устройстве 7 информативную спектральную составляющую сигнала, формируемую генератором испытательного сигнала 2. В результате величина разности фаз определяется зависимостью:

$$\begin{aligned} \Delta\psi &= \psi_g - \frac{\psi_{1\text{inf}} + \psi_{2\text{inf}}}{2} = \\ &= \psi_g - \frac{\psi_g + \Delta\varphi_1 + \psi_g + \Delta\varphi_2}{2} = \frac{\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2}{2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Величина разности фаз коррелирована с сопротивлением в месте дефекта витковой изоляции и связана зависимостью:

$$R_i(\Delta\varphi) = a_{1i} \cdot \Delta\varphi^0 + a_{2i} \cdot \Delta\varphi^{1/2} + a_{3i} \cdot \Delta\varphi^1 + a_{4i} \cdot \Delta\varphi^{3/2} + a_{5i} \cdot \Delta\varphi^{5/2}, \quad (11)$$

где  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  – начальные значения коэффициентов, зависящие от типа выбранной электрической машины;  $i$  – тип выбранной электрической машины;  $\Delta\varphi$  – разность фаз, полученная на фазовом детекторе.

Для полной диагностики состояния обмоток электрической машины с помощью блока переключателей 2 в измерительной системе меняют местами выводы для подключения к генератору испытательного напряжения и одного из выводов двух других обмоток (например, выводы А и В).

Для наглядности исследуем дефект изоляции в обмотках статора трёхфазного асинхронного двигателя со всыпной обмоткой с напряжением питания 380 В и мощностью 380 Вт АИР63В4У30, определив в них место и уровень дефектного межвиткового

сопротивления. Резонанс обмотки данного двигателя находится в области 45 кГц. Для этого с помощью генератора испытательного напряжения, реализуемого на основе программируемого микроконтроллера STM32F103C8TB6c и усилителя мощности, построенного на MOSFET-транзисторе IRF740, организуем импульсную последовательность, где, задавая временные параметры этой последовательности, выделим 13-ю спектральную составляющую, максимально подавив расположенные рядом (т. е. 11-ю, 12-ю, 14-ю и 15-ю спектральные составляющие). В результате получим импульсную последовательность с периодом  $T$ , равным 23 мксек.

Далее, согласно выражениям

$$n_{0t_i} = N \cdot T / t_i \quad \text{и} \quad n_{0t_{z1}} = N \cdot T / 2t_{z1},$$

в формируемой импульсной последовательности определим длительность импульса и задержку между импульсами. Таким образом, имеем следующие значения:

$$t_i = N \frac{T}{n_{0t_i}} = 1.3 \text{ мксек};$$

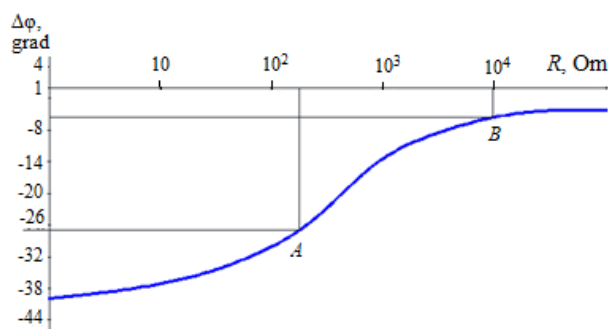
$$t_{z1} = N \frac{T}{2n_{0t_{z1}}} = 1.8 \text{ мксек};$$

$$t_{z2} = N \frac{T}{2n_{0t_{z2}}} = 3.5 \text{ мксек};$$

$$t_{z3} = N \frac{T}{2n_{0t_{z3}}} = 7.2 \text{ мксек}.$$

На вывод А фазной обмотки исследуемого асинхронного двигателя подаём сформированный импульсный сигнал, а с выводов В и С с помощью измерительных резисторов снимаем результирующие выходные сигналы. Затем, полученные с двух плеч измерительной системы сигналы складываются в суммирующем устройстве, построенном на интегральном двухвентильном операционном усилителе ОРА2237. Результирующий сигнал сумматора, представляющий собой комплекс спектральных составляющих с индивидуальными параметрами, подаётся на избирательное устройство, реализованное на прецизионном

операционном усилителе AD8551ARZ и настроенное на информативную спектральную составляющую. Здесь выделяется сигнал (спектральная составляющая) частотой 44,5 кГц, который подаётся на один из измерительных входов микропроцессорного устройства, где по относительному смещению фазы относительно базового сигнала, подаваемого на второй измерительный вход микропроцессорного устройства, на основании зависимости  $\Delta\varphi = f(R)$ , определённой для данного типа двигателя и в соответствии с уравнением (11) и коэффициентами для этого двигателя, полученными ранее,  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ , выявляется обмотка диагностируемого электродвигателя с дефектом изоляции и определяется значение межвиткового сопротивления, информация о чём транслируется на индикаторе. На рисунке 4 в точке А видно, что значение  $\Delta\varphi$  при такой схеме подключения (рисунок 1) составляет  $27^\circ$ , а сопротивление в обмотке с дефектом будет на уровне  $10^5$  Ом.



**Рисунок 4** – Определение межвиткового сопротивления в обмотках электрических машин по измеренному значению разности фаз

**Figure 4** – Detection of interturn resistance in the electrical machines' windings by the measured value of the phase difference

Изменив схему подключения двигателя, а именно поменяв контакты А и В местами и повторно измерив выходные сигналы, получим значения  $\Delta\varphi = 7^\circ$  и  $R \approx 10$  кОм (рисунок 4 точка В). Сравнив значения сопротивлений в двух случаях измерения, можно сделать заключение, что в диагностируемом асинхронном электродвигателе присутствует дефектная фазная обмотка, а, следовательно, он неисправен и не способен работать в номинальном режиме. Причиной неисправности является прогрессирующий дефект изоляции в обмотке с выводом В и двигателю необходим ремонт.

## Заключение

Представлен принцип функционирования устройства по измерению ослабленного межвиткового сопротивления в обмотках электрических машин как устройства анализа его работоспособного состояния.

Разработан прибор, позволяющий по фазовым соотношениям сигналов, полученных с двух фаз, включённых как плечи измерительного активно-индуктивного моста формируемого обмотками ЭМ, с высокой точностью измерять минимальные значения межвитковых сопротивлений в обмотках электрических машин, что, в свою очередь, позволит фиксировать дефектообразование в них на ранних стадиях развития.

Представленный прибор может служить основой для построения автоматизированных контрольно-диагностических систем для проверки состояния обмоток электрических машин.

## Список использованных источников

1. Иванов В.Н. Анализ надёжности тяговых электрических машин электровозов, эксплуатируемых на железных дорогах восточного региона, статьи технической тематики из периодических изданий, Регионального Центра Инновационных Технологий, [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rcit.su/article080.html>

2. Gritli Y., Filippetti F., Casadei D. Diagnosis and Fault Detection in Electrical Machines and Drives based on Advanced Signal Processing Techniques. Department of Electrical, Electronic, and Information Engineering "Guglielmo Marconi", Ph.D. in Electrical Engineering XXVI Cycle Power Electronics, Electrical Machines and Drives (ING-IND/32), 2014, 131 p.

3. Nuriddinov S., Avazov B., Hasanov F., Rakhmonova Y. Analysis of the causes of traction electric failures of electric cargo cars operated on railways of the Republic of Uzbekistan. E3S Web of Conferences, 2021, vol. 264, p. 05041.

DOI: 10.1051/e3sconf/202126405041

4. Волчихин В.И. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин / В.И. Волчихин. – Воронеж: Кварта. – 2004. – 312 с.

5. Гутов И.А. Математические модели для прогнозирования технического состояния изоляции электрооборудования. / И.А. Гутов // Ползуновский вестник. – 2009. – № 4.

6. Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин. 8-е изд., испр. и доп. – Л.: Энергия, 1995. – 296 с.



7. Патент BY20042. Способ комплексного контроля трехфазной электрической машины / Ю.В. Суходолов, А.В. Белоусов, Л.П. Крученюк; заявл. 11.01.2012.

8. Patent WO2014136052A1. Raúl Esteban, Jimenez Mejia, Guillermo León, Mesa Betancur. Method and system for the detection and diagnosis of faults in electric machines when in operation; 12.09.2014.

9. Патент RU2529596. Способ диагностики межвитковых замыканий асинхронного электродвигателя // И.Ф. Суворов, Р.В. Горбунов, Г.А. Палкин; заявл. 27.09.2014.

10. Патент RU2213270. Способ диагностики и оценки остаточного ресурса электроприводов переменного тока / Ю.Л. Жуковский, С.И. Таранов; заявл. 10.11.2014.

11. Патент RU2289143C2. Способ комплексного контроля трехфазной обмотки электрической машины / С.А. Сильвашко, В.Н. Булатов, В.Д. Шевеленко; заявл. 10.12.2006.

12. Патент RU2339962. Способ контроля трехфазной обмотки электрической машины / В.Н. Булатов, С.А. Сильвашко, 2011.

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

## References

1. Ivanov V.N. *Analiz nadozhnosti tyagovykh elektricheskikh mashin elektrovozov, ekspluatiruyemykh na zheleznikh dorogakh vostochnogo regiona* [Analysis of the reliability of traction electric machines of electric locomotives operated on the railways of the eastern region]. Technical articles from periodicals Regional Center for Innovative Technologies. [Electronic Resource]. Available at: <https://rcit.su/article080.html>

2. Gritli Y., Filippetti F., Casadei D. Diagnosis and Fault Detection in Electrical Machines and Drives based on Advanced Signal Processing Techniques. Department of Electrical, Electronic, and Information Engineering “Guglielmo Marconi”, Ph.D. in Electrical Engineering XXVI Cycle Power Electronics, Electrical Machines and Drives (ING-IND/32), 2014, 131 p.

3. Nuriddinov S., Avazov B., Hasanov F., Rakhmonova Y. Analysis of the causes of traction electric failures of electric cargo cars operated on railways of the Republic of Uzbekistan. E3S Web of Conferences,

2021, vol. 264, p. 05041.

DOI: 10.1051/e3sconf/202126405041

4. Volchikhin V.I. *Ispytaniya, ekspluatatsiya i remont elektricheskikh mashin* [Testing, operation and repair of electrical machines]. Voronezh: Quarta Publ., 2004, 312 p.

5. Gutov I.A. *Matematicheskiye modeli dlya prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya izolyatsii elektrooborudovaniya* [Mathematical models for predicting the technical condition of electrical equipment insulation], *Polzunovskiy Vestnik*, 2009, no. 4.

6. Gemke R.G. *Neispravnosti elektricheskikh mashin. 8-ye izd., ispr. i dop.* [Malfunctions of electrical machines. 8th ed., rev. and additional]. L.: Energy Publ., 1995, 296 p.

7. Sukhodolov Yu.V., Belousov A.V., Kruchenok L.P. *Sposob kompleksnogo kontrolya trekhfaznoy elektricheskoy mashiny* [Method of complex control of a three-phase electric machine]. Patent BY20042, 11.01.2012.

8. Raúl Esteban, Jimenez Mejia, Guillermo León, Mesa Betancur. Method and system for the detection and diagnosis of faults in electric machines when in operation. Patent WO2014136052A1, 12.09.2014.

9. Suvorov I.F., Gorbunov R.V., Palkin G.A. *Sposob diagnostiki mezhvitkovykh zamykaniy asinkhronnogo elektrodvigatelya* [Method for diagnosing interturn short circuits of an asynchronous electric motor]. Patent RU2529596, 09.27.2014.

10. Zhukovskiy YU.L., Taranov S.I. *Sposob diagnostiki i otsenki ostatochnogo resursa elektroprivodov peremennogo toka* [Way of diagnosing and evaluating the residual resource of alternating current electric drives]. Patent RF, no. 2526500C1, 10.11.2014.

11. Sil'vashko S.A., Bulatov V.N., Shevelenko V.D. *Sposob kompleksnogo kontrolya trekhfaznoy obmotki elektricheskoy mashiny* [A way of comprehensive control of a three-phase winding of an electric machine]. Patent RF, no. 2289143C2, 10.12.2006.

12. Bulatov V.N., Sil'vashko S.A. *Sposob kontrolya trekhfaznoy obmotki elektricheskoy mashiny* [A method of monitoring a three-phase winding of an electric machine]. Patent RF, no. 2339962C1, 2011.

13. Sukhodolov Yu.V., Isaev A.V., Zelenko V.V., Sizikov S.V. *Vozmozhnost' opredeleniya defektov v obmotkakh elektricheskikh mashin chastotnymi metodami* [The possibility of determining defects in the windings of electrical machines by frequency methods]. *Metrologiya i priborostroyeniye* [Metrology and instrument making], 2022, no. 3, pp. 10–17.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-135-144

## Измерение электрического потенциала поверхности с использованием статического зонда

Р.И. Воробей, О.К. Гусев, А.Л. Жарин, В.А. Микитевич, К.В. Пантелеев,  
А.В. Самарина, А.И. Свистун, А.К. Тявловский, К.Л. Тявловский

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

Поступила 03.02.2023

Принята к печати 10.03.2022

Методы контроля изменений электрического потенциала поверхности широко используются в операциях неразрушающего контроля прецизионных поверхностей, например, в электронной промышленности в процессе изготовления полупроводниковых приборов. Целью работы является расширение области применения методик бесконтактного контроля и измерения электрического потенциала поверхности на основе использования статического отсчётного электрода.

Рассмотрены особенности построения и применения устройств измерения электрического потенциала поверхности с использованием неподвижного отсчётного электрода. Несмотря на необходимость увеличения площади зонда по сравнению с устройствами, использующими вибрирующий зонд, методики измерения с неподвижным зондом имеют ряд преимуществ и расширяют область применения измерений электрического потенциала поверхности в контроле изделий с прецизионными поверхностями. Приведены модели формирования измерительного сигнала при наличии пространственной неоднородности электрического потенциала поверхности.

**Ключевые слова:** электрический потенциал поверхности, поверхностная фото-ЭДС, метод Кельвина, двухконденсаторный метод, статический зонд

---

**Адрес для переписки:**

Тявловский К.Л.  
Белорусский национальный технический университет,  
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь  
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by

---

**Address for correspondence:**

Tyavlovsky K.L.  
Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus  
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by

---

**Для цитирования:**

Р.И. Воробей, О.К. Гусев, А.Л. Жарин, В.А. Микитевич,  
К.В. Пантелеев, А.В. Самарина, А.И. Свистун,  
А.К. Тявловский, К.Л. Тявловский.

Измерение электрического потенциала поверхности  
с использованием статического зонда.

Приборы и методы измерений.

2023. – Т. 14, № 2. – С. 135–144.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-135-144

---

**For citation:**

R.I. Vorobey, O.K. Gusev, A.L. Zharin, V.A. Mikitevich,  
K.U. Pantsialeu, A.V. Samarina, A.I. Svistun,  
A.K. Tyavlovsky, K.L. Tyavlovsky.

[Surface Electric Potential Measurement with a Static Probe].  
Devices and Methods of Measurements.

2023, vol. 14, no. 2, pp. 135–144 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-135-144

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-135-144

## Surface Electric Potential Measurement with a Static Probe

R.I. Vorobey, O.K. Gusev, A.L. Zharin, V.A. Mikitsevich, K.U. Pantsialeyeu, A.V. Samarina,  
A.I. Svistun, A.K. Tyavlovsky, K.L. Tyavlovsky

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

Received 03.02.2023

Accepted for publication 10.03.2023

### Abstract

Surface electric potential measurements are widely used in non-destructive inspection and testing of precision surfaces, for example, in the production of semiconductor devices and integrated circuits. Features of the construction and application of devices for measuring the surface electric potential using an immovable reference electrode are considered. Despite the need to increase the area of the probe compared to devices with a vibrating probe, measurement techniques with an immovable probe have a number of advantages and could expand the scope of surface electric potential measurements in the inspection of samples with precise surfaces. Models of the formation of a measuring signal in the presence of a spatial inhomogeneity of surface electric potential are presented and discussed.

**Keywords:** surface electric potential, surface photovoltage, Kelvin probe technique, two-capacitor technique, static probe

---

#### Адрес для переписки:

Тявловский К.Л.  
Белорусский национальный технический университет,  
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь  
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by

---

#### Address for correspondence:

Tyavlovsky K.L.  
Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus  
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by

---

#### Для цитирования:

Р.И. Воробей, О.К. Гусев, А.Л. Жарин, В.А. Микитевич,  
К.В. Пантелеев, А.В. Самарина, А.И. Свистун,  
А.К. Тявловский, К.Л. Тявловский.

Измерение электрического потенциала поверхности  
с использованием статического зонда.

Приборы и методы измерений.

2023. – Т. 14, № 2. – С. 135–144.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-135-144

---

#### For citation:

R.I. Vorobey, O.K. Gusev, A.L. Zharin, V.A. Mikitsevich,  
K.U. Pantsialeyeu, A.V. Samarina, A.I. Svistun,  
A.K. Tyavlovsky, K.L. Tyavlovsky.

[Surface Electric Potential Measurement with a Static Probe].  
Devices and Methods of Measurements.

2023, vol. 14, no. 2, pp. 135–144 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-135-144

## Введение

Различные методики измерения электрического потенциала поверхности, основанные на методе Кельвина, широко используются при контроле и исследовании различных свойств изделий и материалов с прецизионными поверхностями [1–3]. Новые достижения электроники и техники измерений позволили существенно улучшить метрологические характеристики и область применения метода, чему также способствует неразрушающий характер контроля и высокая чувствительность метода к любым изменениям свойств приповерхностных слоёв, т. к. изменения потенциала поверхности обусловлены изменениями работы выхода электрона, связанными с изменениями химических, физических и структурных свойств приповерхностных слоёв. Чувствительность методов контроля к изменению свойств поверхности весьма высока, так один монослой адсорбированных частиц может вызвать изменение поверхностного потенциала полупроводника на величину порядка 1 В [4], а инструментальная чувствительность методов измерения поверхностного потенциала составляет величину 0,1...1 мВ [5]. Чувствительность метода измерения 1 мВ соответствует возможности обнаружения покрытий поверхности полупроводника, соответствующих одному элементарному заряду на  $10^7$  поверхностных атомов. Под действием контактной разности потенциалов  $U_{CPD}$  между поверхностями отсчётного электрода и объекта контроля происходит разделение заряженных частиц в межэлектродном зазоре и их движение к противоположно заряженным электродам, создавая электрический ток, который может быть измерен измерительным усилителем со сверхвысоким входным сопротивлением.

В современной технике измерений электрического потенциала поверхности существует несколько направлений, с одной стороны:

– применение дополнительных воздействий для выделения информации о физических параметрах приповерхностных слоев [6, с. 17–21], например, времени жизни и поверхностного сопротивления, концентрации железа в кремнии при использовании методики сканирующей

фотостимулированной электрометрии [6, с. 47–51];

– повышение пространственной разрешающей способности, вплоть до размеров на уровне 10 нм [7].

Эти методики в качестве чувствительного элемента используют конструкцию динамического конденсатора, когда в качестве зонда используется вибрирующий электрод малых размеров. С другой стороны, существует ряд применений [8], где требуется получить информацию сразу со всего образца, без необходимости определения локализации каких-либо отклонений контролируемого параметра. Например, при спектроскопических исследованиях поверхности полупроводников. Паразитная модуляция излучения вибрирующим электродом или необходимость помещения вибрирующего узла в вакуум затрудняют применение классической методики Кельвина с вибрирующим конденсатором.

Целью работы являлся анализ особенностей построения измерительных преобразователей бесконтактного контроля электрического потенциала поверхности с использованием структуры чувствительного элемента с неподвижным зондом.

## Измерение электрического потенциала поверхности с использованием структуры чувствительного элемента с неподвижным зондом

При использовании в измерительном преобразователе современных операционных усилителей со сверхнизкими входными токами [9] на уровне единиц фемтоампер возможно построение измерителя электрического потенциала поверхности по схеме со статическим электродом [10–13] чувствительного элемента (рисунок 1а) с чувствительностью, сравнимой с методикой вибрирующего электрода. Так как измерения проводятся на постоянном токе, в отличие от схемы с вибрирующим электродом, использующей измерения на переменном токе, то чувствительность этой схемы намного ниже. Для приближения чувствительности метода с неподвижным электродом к чувствительности методик с вибрирующим зондом можно использовать несколько способов. Во-первых, это



конструктивные методы – увеличение площади зонда и уменьшение межэлектродного зазора зонд-исследуемая поверхность, во-вторых, схемотехнические – использование во входном каскаде измерительного преобразователя трансимпедансного усилителя А1 [14] с применением прецизионных операционных усилителей со сверхнизкими входными токами и введение в цепь компенсации источника переменного напряжения с периодом

менее длительности переходных процессов поверхностной фото-ЭДС и амплитудой, превышающей её возможные изменения, что дополнительно с применением интегратора в цепи обратной связи позволяет устранить ошибку гистерезиса передаточной характеристики измерительного преобразователя (рисунок 1b). Измерительные преобразователи формируют компенсирующее напряжение  $U_{comp} = -U_{CPD}$ .

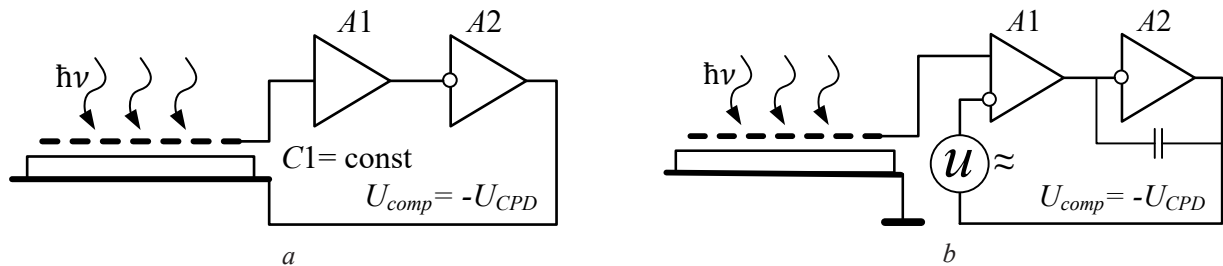


Рисунок 1 – Схема измерения электрического потенциала поверхности со статическим электродом

Figure 1 – Basic diagram of surface electric potential measurements with a static probe

Разновидностью построения схем измерительных преобразователей является двухконденсаторная схема чувствительного элемента, в которой чувствительный элемент образован конденсатором  $C1$  неподвижный зонд – поверхность образца, а в измерительную цепь входят также динамический конденсатор  $C2$ , вынесенный за пределы измерительной ячейки, и входные ёмкость  $C_{in}$  и сопротивление  $R_{in}$  усилителя измерительного сигнала (рисунок 2). Хотя отсчётным электродом в этой схеме является поверхность конденсатора  $C1$ , модулятором измерительного сигнала служит динамический конденсатор  $C2$ , что приводит к снижению чувствительности схемы (1) по сравнению с методиками, где отсчётным электродом непосредственно является одна из обкладок динамического конденсатора.

Двухконденсаторная схема позволяет использовать в качестве динамического конденсатора  $C2$  промышленные компоненты, например, динамические конденсаторы типа ЕВП, хорошо защищенные от внешних помех и воздействий. При этом внутри измерительной ячейки может находиться только электрод зонда статического конденсатора  $C1$ , и дополнительные воздействующие факторы (электрическое поле, агрессивная газовая

среда, вакуум и др.) не будут влиять на другие компоненты измерительной цепи. Недостатком такой схемы измерения является снижение чувствительности с коэффициентом  $\beta$  по сравнению с методом вибрирующего зонда, пропорциональное отношению ёмкостей  $C_2$  и  $C_1$ :

$$\beta = C_1^2 / (C_1 + C_2)(C_1 + \Delta C_2), \quad (1)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – ёмкости статического и динамического конденсаторов;  $\Delta C_2$  – изменение ёмкости динамического конденсатора при вибрации.

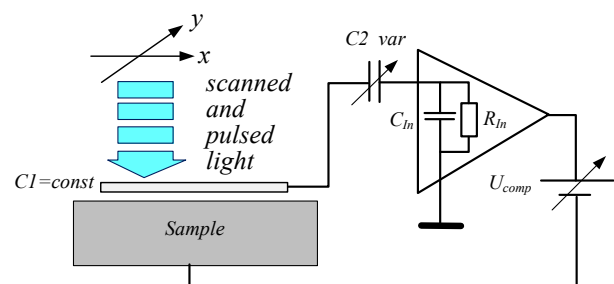


Рисунок 2 – Двухконденсаторная схема измерения электрического потенциала поверхности со статическим электродом

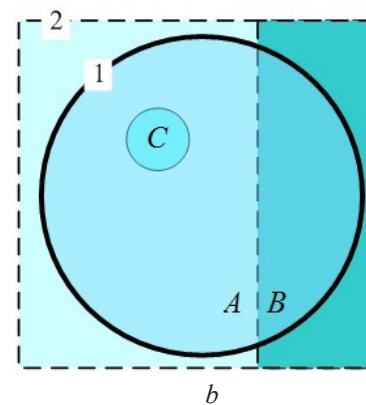
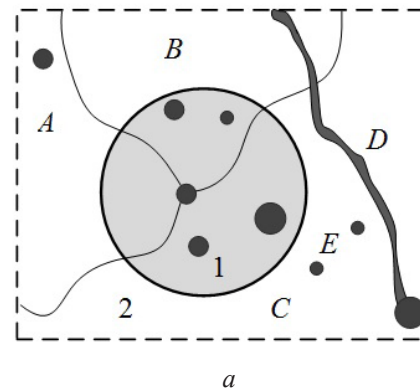
Figure 2 – Basic diagram of surface electric potential measurements with a static probe using a two-capacitor technique

Из (1) следует, что в случае, когда  $C_1$  намного больше  $C_2$  чувствительность практически не уменьшается, т. к.  $\beta$  стремится к 1. Но уже при  $C_1 \approx C_2$  чувствительность уменьшается почти в десять раз, что вынуждает либо увеличивать ёмкость  $C_1$ , увеличивая площадь зонда, либо ужесточать требования к чувствительности входного усилителя  $A_1$ .

### Измерение электрического потенциала поверхности с пространственной неоднородностью

Бесконтактные измерения электрического потенциала поверхности методом Кельвина и его разновидностями имеют ряд методических особенностей [1, 5, 15], что в свою очередь приводит к необходимости их учёта при контроле свойств материалов и изделий и разработке средств метрологического обеспечения методов неразрушающего контроля. В первую очередь таким фактором, неизбежно сопровождающим любые измерения, является неоднородность свойств поверхностей исследуемого образца [16–19] и отсчётного электрода зонда измерительной ячейки (рисунок 3). Величина поверхностного потенциала связана с работой выхода электрона (РВЭ), зависит от многих факторов, определяемых как внутренней структурой приповерхностных областей объекта контроля, так и адсорбционными процессами на поверхности, и различна на разных участках поверхности. Относительная лёгкость изменения величины поверхностного потенциала [4] и проявление в этих изменениях практически любых физико-химических процессов на поверхности делает необходимым при анализе результатов измерений учёт «биографии» и пространственной однородности исследуемых объектов контроля [13, 15, 18]. Поверхность объектов контроля даже для изделий с прецизионными поверхностями всегда пространственно неоднородна, что неизбежно проявляется и в неоднородном распределении электрического потенциала поверхности. Особенно этот учёт важен при использовании в измерениях зондов большой площади, как в случае измерений потенциала поверхности с неподвижным зондом. Характерными для топологии поверхностного электрического потенциала поверхности (рисунок 3а) являются:

- крупные участки поверхности с отличающимися значениями потенциала (участки  $A, B, C$ );
- линейные дефекты  $D$ ;
- точечные дефекты  $E$ .

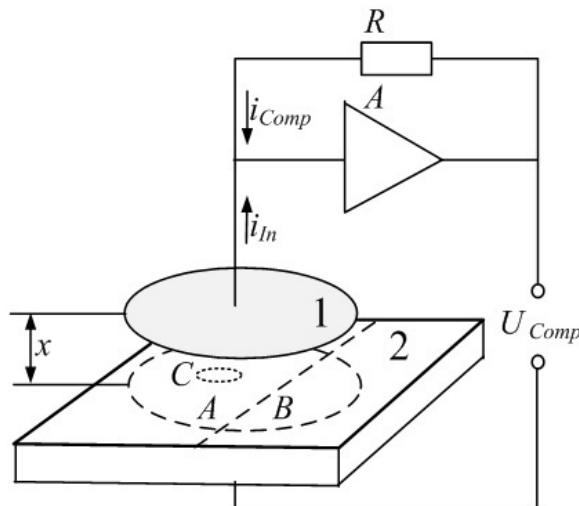


**Рисунок 3** – Топология поверхности с дефектами (а) и модель пространственного распределения электрического потенциала поверхности (b)

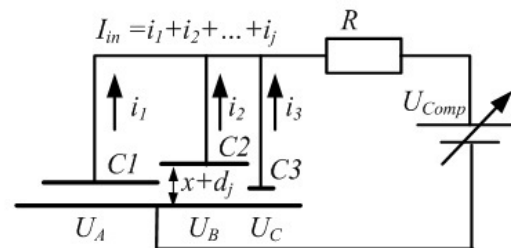
**Figure 3** – Topology of surface containing multiple defects (a) and model of surface electric potential distribution (b)

Необходимо отметить, что численные значения РВЭ для некоторых типов дефектов поверхности могут совпадать, и тогда пространственное распределение потенциала поверхности под зондом 1 исследуемого образца 2 можно представить моделью на рисунке 3b. Соответственно с этой моделью измеряемый электрический потенциал поверхности не будет точно определяться ни одним из значений РВЭ для частных участков  $A-C$  в проекции зонда. Модель эффективной работы выхода, по существу, отражает существование значительной гетерогенности свойств поверхности [15].

При этом, наблюдаемые изменения поверхностного потенциала могут быть вызваны не изменением работы выхода электрона на дефектах какого-то определённого типа [4], а изменением соотношения площадей микроучастков поверхности с разным составом дефектов, или адсорбционными явлениями на них.



При неоднородном распределении потенциала поверхности систему отсчётный электрод–исследуемая поверхность можно представить [20] в виде электрически соединенных конденсаторов, каждый со своим средним расстоянием между отсчётным электродом и исследуемой поверхностью, и напряжением между обкладками (рисунок 4).



**Рисунок 4** – Схема измерения поверхностного потенциала и эквивалентная схема измерительной ячейки в случае неоднородной поверхности

**Figure 4** – Basic diagram of surface electric potential measurements and equivalent circuit of a measuring cell for the case of non-homogeneous surface

Если измерительная ячейка образована тремя конденсаторами (рисунок 4), то из условия сохранения заряда  $Q$  следует:

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 + Q_3 = C_1(U_1 - U_{comp}) + C_2(U_2 - U_{comp}) + C_3(U_3 - U_{comp}), \quad (2)$$

где  $Q_1, Q_2, Q_3$  – заряд на участках поверхности  $A, B, C$ , в проекции электрода 1;  $C_1, C_2, C_3$  – ёмкости конденсаторов электрод 1 – участки поверхности  $A, B, C$ ;  $U_1, U_2, U_3$  – потенциалы поверхности под участками поверхности  $A, B, C$  в проекции электрода 1, соответственно.

Математическое моделирование в среде *MathCAD* соотношения (2) относительно измеряемого значения компенсирующего напряжения  $U_{comp}$  показывает, что аналитическое выражение для  $U_{comp}$  уже при числе микроучастков неоднородности более двух становится чрезвычайно громоздким [20, 21]. Однако графический вид зависимости  $U_{comp}$  от межэлектродного зазора слабо зависит от числа микроучастков, и в большей степени определяется соотношением площадей микро-

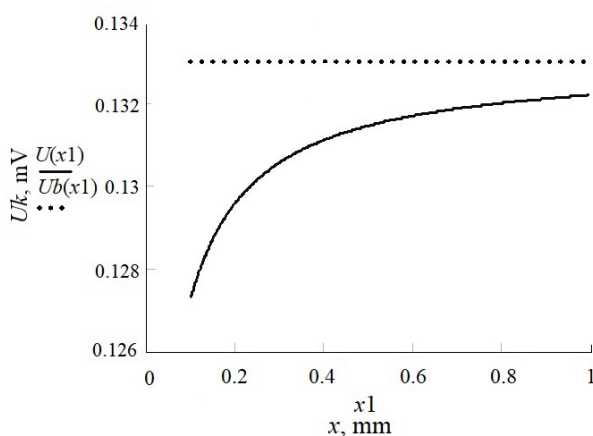
участков (моделируется соотношением ёмкостей  $C_i - C_j$ ) с различными потенциалами поверхности. Типичная зависимость компенсирующего напряжения от межэлектродного зазора приведена на рисунке 5. При увеличении межэлектродного зазора величина измеряемого компенсирующего напряжения стремится к среднему значению потенциала поверхности в проекции отсчётного электрода. При однородной поверхности под отсчётным электродом дистанционная зависимость компенсирующего напряжения отсутствует.

Из результатов моделирования величины измеряемого значения компенсирующего напряжения в случае неоднородной поверхности образца следует, что измеряемое значение поверхностного потенциала будет всегда занижено по отношению к среднему значению потенциала под электродом. При этом, дистанционная зависимость компенсирующего напряжения позволяет определять статистические параметры пространственного распределения поверхностного потенциала (среднее

значение и среднеквадратическое отклонение) даже при размерах микрон неоднородностей существенно меньших размеров отсчётного электрода. При наличии пространственной неоднородности электрического потенциала поверхности следует учитывать следующие факторы:

- при наличии под зондом Кельвина нескольких (более двух) кластеров наблюдается зависимость  $U_{CPD}$  от расстояния между образцом и отсчётным электродом;

- удельный вес  $P_i$  кластеров в формировании среднего значения работы выхода больше для кластеров с меньшим значением работы выхода.



**Рисунок 5** – Результаты моделирования компенсирующего напряжения от межэлектродного зазора при неоднородной поверхности

**Figure 5** – The model plot of compensation voltage vs probe-to-sample gap for non-homogeneous surface case

Эти факторы часто определяют неоднозначность соответствия среднего для объекта контроля значения  $U_{CPD}$  типу и качеству обработки поверхности при сравнении образцов с разной степенью неоднородности свойств поверхности [6, 16, 20].

### Метрологическая модель измерений электрического потенциала поверхности

Метрологическая модель [21] измерений электрического потенциала поверхности и параметров однородности его пространственного распределения выражается объединением нескольких частных погрешностей: геометрической погрешности формы и расположения каждого исследуемого микроучастка

$\Delta x_i$ , погрешности расстояния между зондом и поверхностью  $\Delta d_i$ , неопределённости значения электрического потенциала в пределах контролируемой области  $\Delta U_0$ :

$$\Delta U_{CPD}(x) = \left( \sum_j (\Delta x_j * \Delta d_j) \right) \Delta U_0. \quad (3)$$

Если в методике измерения поверхностного потенциала использовать дистанционную зависимость измеряемого значения потенциала (рисунок 5) как дополнительный независимый канал измерительной информации, то анализ параметров этой зависимости (2) позволяет осуществлять неразрушающий контроль параметров пространственного распределения дефектов с характерными размерами много меньшими размеров отсчётного электрода [20]. При этом обнаружительная способность метода ограничивается только длиной экранирования электрического поля в области дефектов [4] и может составлять величину десятки-сотни нанометров при размерах отсчётного электрода более 1 мм [15, 20]. Но определить локализацию дефектов внутри проекции отсчётного электрода при этом невозможно. Для ряда операций контроля изделий с прецизионными поверхностями это несущественно, но приводит к затруднениям при проведении процедур калибровки и эталонирования измерительных установок. В [21] для проведения процедуры эталонирования поверки предлагается использовать тестовую структуру, поверхность которой образована совокупностью проводящих участков, разбитых на группы, каждая из которых подключается к первичному источнику эталонного потенциала. Размеры тестовой структуры должны превышать размеры проекции отсчётного электрода измерительной системы не менее чем на величину межэлектродного зазора. Параметры пространственного распределения потенциала поверхности эталона задаются коммутацией матрицы тестовых электродов к матрице источника эталонного потенциала [21]. Это позволяет формировать определённый тип пространственного распределения, задаваемый конфигурацией матрицы ключей, что соответственно приводит к тому или иному типу (2) зависимости измерительного сигнала от межэлектродного зазора системы отсчётный электрод–тестовая структура (рисунок 5).



Метрологическая модель системы отсчётный электрод измерительной установки – тестовая структура  $\Delta U_{TC}$  может быть выражена объединением погрешности эталонного источника  $\Delta U_{iЭт}$ , погрешности тестовой структуры  $\Delta U_{iTC}$ , определяемой неоднородностью распределения потенциала поверхности тестового электрода  $U_{iс}$ , а также геометрической погрешности расстояния между электродом и тестовой структурой, выраженной через погрешность эквивалентной электрической ёмкости ячейки тестовой структуры  $\Delta C_i$ :

$$\Delta U_{TC} = \Delta U_{iЭт} \times \Delta U_{iTC} \times \Delta C_i. \quad (4)$$

При разработке конструкции и изготовлении матрицы эталонированных электродов необходимо принять меры по уменьшению влияния технологического разброса значений поверхностного потенциала самих эталонных электродов.

## Заключение

Методика измерения электрического потенциала поверхности с использованием статического отсчётного электрода обеспечивает возможность использования простой конструкции чувствительного элемента без применения подвижных элементов, что позволяет помещать измерительную ячейку внутрь газовых и вакуумных систем, включать их в состав оптических схем без влияния на измерительный сигнал паразитной модуляции.

Применение неподвижного электрода по сравнению с методиками, где отсчётный электрод входит в состав вибрирующего конденсатора, обеспечивает расширение области применения методик измерения электрического потенциала поверхности, например, в область спектроскопических исследований свойств поверхности. Устранение ряда методических ограничений сопровождается снижением абсолютной чувствительности, что вынуждает использовать во входных электронных узлах измерительных преобразователей операционных усилителей со сверхмалыми входными токами (менее 10 фА).

Приведено сравнение и особенности применения методик измерения электрического потенциала поверхности с использованием

неподвижного отсчётного электрода в схеме статического конденсатора и двухконденсаторной схеме измерительной ячейки.

Рассмотрено влияние неоднородности свойств поверхности на формирование измерительного сигнала. Показано, что обнаружительная способность метода к неоднородности свойств поверхности при наличии дефектов ограничивается только длиной экранирования электрического поля в области дефектов и может составлять величину десятки-сотни нанометров при размерах отсчётного электрода более 1 мм [2, 4]. Однако, определение локализации дефектов внутри проекции отсчётного электрода при этом невозможно.

Приведены особенности составляющих погрешности в метрологической модели формирования измерительного сигнала в методике измерения электрического потенциала поверхности с использованием статического отсчётного электрода.

## Список использованных источников

1. *Kronik L.* Surface photovoltage phenomena: theory, experiment, and applications / Leor Kronik, Yoram Shapira // *Surface Science Reports*, 1999, vol. 37, iss. 1–5, pp. 1–206. DOI: 10.1016/S0167-5729(99)00002-3
2. *Noras A.* Non-contact surface charge/voltage measurements. Capacitive probe-principle of operation / A. Noras // *Trek*. – 2002. – № 3001. – Рр. 1–8.
3. *Жарин А.Л.* Метод контактной разности потенциалов и его применение в трибологии. – Мн.: Бестпринт, 1996. – 240 с.  
DOI: 10.13140/RG.2.1.3993.8645
4. *Моррисон С.* Химическая физика поверхности твердого тела. – М.: Мир, 1980. – 488 с.
5. *Пантелеев К.В.* Построение измерителей контактной разности потенциалов / К.В. Пантелеев, В.А. Микитевич, А.Л. Жарин // *Приборы и методы измерений*. – 2016. – Т. 7. – № 1. – С. 7–15.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-7-15
6. *Zharin Anatoly.* Determining the lifetime of minority charge carriers and iron impurity concentration in semiconductor structures with submicron layers / A. Zharin [et al.] // *Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 2. – Iss. 4, Article 3. – Рр. 17–21.
7. *Поляков В.В.* Контактная сканирующая емкостная микроскопия большеразмерных образцов / В.В. Поляков // *Научное приборостроение*. – 2009. – Т. 19. – № 3. – С. 62–66.

8. Kronik L. Surface Photovoltage Spectroscopy of Semiconductors / L. Kronik, Y. Shapira // *Encyclopedia of Modern Optics*. – 2005. – Pp. 36–43.

DOI: 10.1016/B0-12-369395-0/00631-X

9. Штрапенин Г. Современные операционные усилители фирмы National Semiconductor / Г. Штрапенин // *Компоненты и технологии*. – 2005. – № 7. – С. 46–51.

10. Крейг А. Исследование зависимости КРП металлов от механического напряжения методом Кельвина / А. Крейг, Е. Радека // *Приборы для научных исследований*. – 1970. – № 2. – С. 99–105.

11. Delchar T. A static capacitor method for the measurement of surface potential of gases on evaporated metal films / T. Delchar, A. Eberhagen, F.C. Tompkins // *J. of Scientific Instr.* – 1963. – Vol. 40. – № 3. – Pp. 105–109.

DOI: 10.1088/0950-7671/40/3/308

12. Jacobs J.C. Surface potential measurements of insoluble monolayers using the static-capacitor method / J.C. Jacobs [et al.] // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 1981. – Vol. 84. – Pp. 270–271.

DOI: 10.1016/0021-9797(81)90285-X

13. Mizse J. Surface potential mapping: comparison of the vibrating capacitor and the SPV method / Janos Mizse // *Solid-State Electronics*. – 2000. – Vol. 44. – Iss. 1. – Pp. 509–513.

DOI: 10.1016/S0038-1101(99)00264-6

14. Ferrari G. Transimpedance amplifier for high sensitivity current measurements on nanodevices / G. Ferrari [et al.] // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. – 2009. – Vol. 44. – No. 5. – Pp. 1609–1616.

DOI: 10.1109/JSSC.2009.2016998

15. Woodall I.M. Summary Abstract: Are they really Schottky barriers after all? / I.M. Woodall, I.L. Frecof // *J. Vac. Sci. Technol.* – 1982. – Vol. 21. – № 2. – Pp. 574–576. DOI: 10.1116/1.571766

16. Baytekin H.T. The Mosaic of Surface Charge in Contact Electrification / H.T. Baytekin [et al.] // *Science*. – 2011. – Vol. 333. – Iss. 6040. – Pp. 308–312.

DOI: 10.1126/science.1201512

17. Yamasue Kohei. Surface Potential Fluctuations of SiO<sub>2</sub>/SiC Interfaces Investigated by Local Capacitance-Voltage Profiling Based on Time-Resolved Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy / Kohei Yamasue, Cho Yasuo // *Materials Science Forum. Silicon Carbide and Related Materials*. – 2021. – Vol. 1062. – Pp. 335–340. DOI: 10.4028/p-2t7zak

18. Glatzel Th. Kelvin probe force microscopy on III-V semiconductors: the effect of surface defects on the local work function / Th. Glatzel [et al.] // *Materials Science and Engineering*. – 2003. – Vol. 102. – Iss. 1–3. – Pp. 138–142.

DOI: 10.1016/S0921-5107(03)00020-5

19. Торхов Н.А. Фрактальная геометрия поверхностного потенциала электрохимически осажденных пленок платины и палладия / Н.А. Торхов, В.А. Новиков // *Физика и техника полупроводников*. – 2009. – Т. 43, вып. 8. – С. 1109–1116.

20. Тявловский К.Л. Многопараметрические измерения электрического потенциала поверхности с использованием адаптивной односигнальной модели / К.Л. Тявловский [и др.] // *Метрология и приборостроение*. – 2008. – № 2. – С. 27–32.

21. Тявловский К.Л. Метрологическое обеспечение бесконтактных измерений параметров микронеоднородного распределения электрического потенциала поверхности / К.Л. Тявловский [и др.] // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. – 2009. – № 4. – С. 34–37.

## References

1. Kronik L., Shapira Y. Surface photovoltage phenomena: theory, experiment, and applications. *Surface Science Reports*, 1999, vol. 37, iss. 1–5, pp. 1–206.

DOI: 10.1016/S0167-5729(99)00002-3

2. Noras A. Non-contact surface charge/voltage measurements. Capacitive probe-principle of operation. *Trek*, 2002, no. 3001, pp. 1–8.

3. Zharin A. Method of contact potential difference and its application in tribology. Minsk: Bestprint Publ., 1996, 240 p.

DOI: 10.13140/RG.2.1.3993.8645

4. Morrison S. Chemical physics of solid state surface. Moscow: Mir Publ., 1980, 488 p.

5. Pantsialeyeu K.U., Mikitsevich U.A., Zharin A.L. Design of the contact potentials difference probes. *Devices and Methods of Measurements*, 2016, vol. 7, no. 1, pp. 7–15 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-7-15

6. Zharin Anatoly, Pantsialeyeu K., Svistun A., Tyavlovsky K. Determining the lifetime of minority charge carriers and iron impurity concentration in semiconductor structures with submicron layers. *Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering*, 2020, vol. 2, iss. 4, Article 3, pp. 17–21.

7. Polyakov V.V. *Kontaknaya skaniruyushchaya emkostnaya mikroskopiya bolsherazmernyh obrazcov* [Application of Scanning Capacitance Microscopy to Large-Scale Samples]. *Nauchnoe priborostroenie* [Scientific Instrumentation Engineering], 2009, vol. 19, no. 3, pp. 62–66 (in Russian).

8. Kronik L., Shapira Y. Surface Photovoltage Spectroscopy of Semiconductors. *Encyclopedia of Modern Optics*, 2005, pp. 36–43.

DOI: 10.1016/B0-12-369395-0/00631-X

9. SHtrapein G. *Sovremennye operacionnye usiliteli firmy National Semiconductor* [Modern operational amplifiers by National Semiconductor]. *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2005, no. 7, pp. 46–51 (in Russian).
10. Craig A., Radeka E. *Issledovanie zavisimosti KRP metallov ot mehanicheskogo napryazheniya metodom Kelvina* [Study of CPD vs mechanical tension dependence of metals by Kelvin probe technique]. *Pribory dlya nauchnykh issledovaniy* [Instrumentation for Scientific Research], 1970, no. 2, pp. 99–105 (in Russian).
11. Delchar T., Eberhagen A., Tompkins F.C. A static capacitor method for the measurement of surface potential of gases on evaporated metal films. *J. of Scientific Instr.*, 1963, vol. 40, no. 3, pp. 105–109.  
**DOI:** 10.1088/0950-7671/40/3/308
12. Jacobs J.C., Buuron A.J.M., Renders P.J.M., Snik A.F.M. Surface potential measurements of insoluble monolayers using the static-capacitor method. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1981, vol. 84, pp. 270–271.  
**DOI:** 10.1016/0021-9797(81)90285-X
13. Mizse J. Surface potential mapping: comparison of the vibrating capacitor and the SPV method. *Solid-State Electronics*, 2000, vol. 44, iss. 1, pp. 509–513.  
**DOI:** 10.1016/S0038-1101(99)00264-6
14. Ferrari G., Gozzini F., Molari A., Sampietro M. Transimpedance amplifier for high sensitivity current measurements on nanodevices. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2009, vol. 44, no. 5, pp. 1609–1616.  
**DOI:** 10.1109/JSSC.2009.2016998
15. Woodall I.M., Freouf I.L. Summary Abstract: Are they really Schottky barriers after all? *J. Vac. Sci. Technol.*, 1982, vol. 21, no. 2, pp. 574–576.  
**DOI:** 10.1116/1.571766
16. Baytekin H.T., Patashinski A.Z., Branicki M., Baytekin B., Soh S., Grzybowski B.A. The Mosaic of Surface Charge in Contact Electrification. *Science*, 2011, vol. 333, iss. 6040, pp. 308–312.  
**DOI:** 10.1126/science.1201512
17. Yamasue Kohei, Yasuo Cho. Surface Potential Fluctuations of SiO<sub>2</sub>/SiC Interfaces Investigated by Local Capacitance-Voltage Profiling Based on Time-Resolved Scanning Nonlinear Dielectric Microscop. *Materials Science Forum. Silicon Carbide and Related Materials*, 2021, vol. 1062, pp. 335–340. **DOI:** 10.4028/p-2t7zak
18. Glatzel Th. Kelvin probe force microscopy on III-V semiconductors: the effect of surface defects on the local work function. *Materials Science and Engineering*, 2003, vol. 102, iss. 1–3, pp. 138–142.  
**DOI:** 10.1016/S0921-5107(03)00020-5
19. Torkhov N.A., Novikov V.A. *Fraktalnaya geometriya poverhnostnogo potentsiala elektrohimicheskii osazhennykh ple-nok platiny i palladiya* [Fractal geometry of surface potential of electrochemically deposited platinum and palladium films]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and technology of semiconductors], 2009, vol. 43, iss. 8, pp. 1109–1116 (in Russian).
20. Tyavlovsky K.L., Tyavlovsky A.K., Vorobei R.I., Gusev O.K., Svistun A.I., Ananchikov I.A. *Mnogo-parametricheskie izmereniya elektricheskogo potentsiala poverhnosti s ispol'zovaniem adaptivnoy odnosignal'noy modeli* [Multi-parameter measurements of surface electrical potential with the use of adaptive one-signal model]. *Metrologiya i priborostroeniye* [Metrology and Instrumentation], 2008, no. 2, pp. 27–32 (in Russian).
21. Tyavlovsky K.L., Gusev O.K., Vorobei R.I. *Metrologicheskoe obespechenie beskontaktnykh izmereniy parametrov mikroneodnorodnogo raspredeleniya elektricheskogo potentsiala poverhnosti* [Metrological assurance of measurements of micro-nonhomogeneous distribution of surface electrical potential]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, control', diagnostika* [Devices and Systems. Control, Monitoring, Diagnostics], 2009, no. 4, pp. 34–37 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-145-151

# Methodology for Determining the Effective Thickness of the Cemented Layer of Steel

Sergei G. Sandomirski, Aleksandr L. Val'ko, Sergej P. Rudenko

Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus,  
Akademicheskaya str., 12, Minsk 220012, Belarus

Received 04.04.2023

Accepted for publication 24.05.2023

## Abstract

Highly loaded transmission gears are cemented and hardened. An important parameter of the hardened cemented layer is its effective thickness  $h_{ef}$ . Metal banding and the unavoidable instrumental error in hardness measuring have a great influence on the reliability of  $h_{ef}$  determination. The purpose of this article was to develop a methodology to improve the reliability of determining of the effective thickness  $h_{ef}$  of the hardened layer in steel after carburizing and quenching.

The value of  $h_{ef}$  is the distance  $h$  from the surface of the product to the hardness zone of 50 HRC. The article substantiates that approximation of hardness change from the distance  $h$  to the product surface will allow to obtain a more reliable dependence of hardness change in the investigated area when making hardness measurements in a wider range of distance  $h$ . Therefore, to increase the reliability of  $h_{ef}$  determination, results of the HV0.5 hardness measurement in an extended range of changes in  $h$  in the vicinity of the analyzed zone were used. The HV0.5 measurement results are converted to HRC hardness values using the formula recommended by the international standard. The HRC( $h$ ) distribution of HRC hardness values in the measurement area is interpolated by a second-degree polynomial which physically correctly reflects the change in metal hardness in the analyzed area. The resulting polynomial is used to determine of the distance  $h_{ef}$  at which the hardness takes on a value of 50 HRC. The methodology was used to determine the  $h_{ef}$  of an 18KhGT steel gear wheel after carburizing and quenching. It is shown that results of two independent measurements of the  $h_{ef}$  sample differ from each other by 0.003 mm. This is significantly less than the permissible error of 0.02 mm of the  $h_{ef}$  determination according to the standard technique. The error of  $h_{ef}$  determination is reduced by extending the range of variation of  $h$  and statistically valid interpolation of the monotonic change in hardness with the distance from the surface of the item in the measurement area.

The developed method of determining the effective thickness  $h_{ef}$  of the hardened steel layer consists in determining the distribution of its hardness in the expanded vicinity of the  $h_{ef}$  area, approximating the obtained dependence by a polynomial of the second degree and solving the square equation obtained with its use. The technique provides a significant reduction in the influence of the structural banding of the metal and the inevitable error in measuring hardness on the result of determining the  $h_{ef}$ . Its application will allow to optimize the cementation regimes of gear wheels to increase their service life.

**Keywords:** surface hardening, cementing, hardness, interpolation of hardness distribution, effective thickness of the hardened layer

---

### Адрес для переписки:

Сандомирский С.Г.  
Объединенный институт машиностроения Национальной  
академии наук Беларуси,  
ул. Академическая, 12, г. Минск 220012, Беларусь  
e-mail: sand\_work@mail.ru

---

### Address for correspondence:

Sandomirski S.G.  
Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy  
of Sciences of Belarus,  
Akademicheskaya str., 12, Minsk 220012, Belarus  
e-mail: sand\_work@mail.ru

---

### Для цитирования:

Sergei G. Sandomirski, Aleksandr L. Val'ko, Sergej P. Rudenko.  
Methodology for Determining the Effective Thickness  
of the Cemented Layer of Steel.  
Приборы и методы измерений.  
2023. – Т. 14, № 2. – С. 145–151.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-145-151

---

### For citation:

Sergei G. Sandomirski, Aleksandr L. Val'ko, Sergej P. Rudenko.  
Methodology for Determining the Effective Thickness  
of the Cemented Layer of Steel.  
Devices and Methods of Measurements.  
2023, vol. 14, no. 2, pp. 145–151.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-145-151

---



DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-145-151

## Методика определения эффективной толщины цементированного слоя стали

С.Г. Сандомирский, А.Л. Валько, С.П. Руденко

Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Академическая, 12, г. Минск 220012, Беларусь

Поступила 04.04.2023

Принята к печати 24.05.2023

Высоконагруженные зубчатые колёса трансмиссий подвергают цементации и закалке. Важным параметром упрочнённого цементированного слоя является его эффективная толщина  $h_{ef}$ . Большое влияние на достоверность определения  $h_{ef}$  оказывают полосчатость металла и неизбежная инструментальная погрешность измерения твёрдости. Цель работы – разработка методики повышения достоверности определения эффективной толщины  $h_{ef}$  упрочнённого слоя в стали после цементации и закалки.

За величину  $h_{ef}$  принимают расстояние  $h$  от поверхности изделия до зоны с твёрдостью 50 HRC. В работе обосновано, что аппроксимация изменения твёрдости от расстояния  $h$  до поверхности изделия позволит получить более достоверную зависимость изменения твёрдости в исследуемой зоне при проведении измерений твёрдости в более широком диапазоне расстояний  $h$ . Поэтому для повышения достоверности определения  $h_{ef}$  использованы результаты измерения твёрдости HV0,5 в расширенном диапазоне изменений  $h$  в окрестности анализируемой зоны. Результаты измерения HV0,5 пересчитаны в значения твёрдости HRC по формуле, рекомендованной международным стандартом. Распределение HRC( $h$ ) значений твёрдости HRC в области измерения интерполировано полиномом второй степени, физически верно отражающим изменение твёрдости металла в анализируемой зоне. Полученный полином использован для определения расстояния  $h_{ef}$ , при котором твёрдость принимает значение 50 HRC. Методика использована для определения  $h_{ef}$  зубчатого колеса из стали 18ХГТ после цементации и закалки. Показано, что результаты двух независимых измерений  $h_{ef}$  образца отличаются друг от друга на 0,003 мм. Это существенно меньше допустимой погрешности 0,02 мм определения  $h_{ef}$  по стандартной методике. Погрешность определения  $h_{ef}$  снижена за счёт расширения диапазона изменения  $h$  и статистически обоснованной интерполяции монотонного изменения твёрдости с расстоянием от поверхности изделия в области измерения.

Разработанная методика определения эффективной толщины  $h_{ef}$  упрочнённого слоя стали заключается в определении распределения её твёрдости в расширенной окрестности области  $h_{ef}$ , аппроксимации полученной зависимости полиномом второй степени и решении полученного с его использованием квадратного уравнения. Методика обеспечивает существенное снижение влияния структурной полосчатости металла и неизбежной погрешности измерения твёрдости на результат определения  $h_{ef}$ . Её применение позволит оптимизировать режимы цементации зубчатых колёс для повышения ресурса их эксплуатации.

**Ключевые слова:** поверхностное упрочнение, цементация, твёрдость, интерполяция распределения твёрдости, эффективная толщина упрочнённого слоя

**Адрес для переписки:**

Сандомирский С.Г.

Объединенный институт машиностроения Национальной  
академии наук Беларуси,  
ул. Академическая, 12, г. Минск 220012, Беларусь  
e-mail: sand\_work@mail.ru

**Address for correspondence:**

Sandomirski S.G.

Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy  
of Sciences of Belarus,  
Akademicheskaya str., 12, Minsk 220012, Belarus  
e-mail: sand\_work@mail.ru

**Для цитирования:**

Sergei G. Sandomirski, Aleksandr L. Val'ko, Sergej P. Rudenko.  
Methodology for Determining the Effective Thickness  
of the Cemented Layer of Steel.

Приборы и методы измерений.

2023. – Т. 14, № 2. – С. 145–151.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-145-151

**For citation:**

Sergei G. Sandomirski, Aleksandr L. Val'ko, Sergej P. Rudenko.  
Methodology for Determining the Effective Thickness  
of the Cemented Layer of Steel.

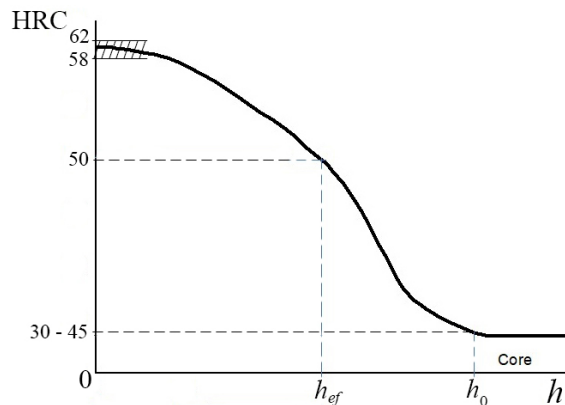
Devices and Methods of Measurements.

2023, vol. 14, no. 2, pp. 145–151.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-145-151

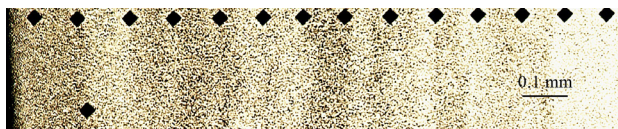
## Introduction

For long and reliable operation of mobile machinery transmissions, the hardness in the area of maximum deep contact stresses occurring at some distance from the gearing surface is important [1, 2]. Cementation (saturation of the surface layer of low-carbon steel with carbon) followed by hardening is the main method of surface hardening steel to the required depth [3–7]. This chemical heat treatment (CHT) forms a surface layer in low-carbon steel with a decreasing concentration of carbon from the surface to the core of the part. Cemented quenching produces high-carbon martensite in the surface layer with high hardness and wear resistance, while the core retains low hardness and high toughness (Figure 1).



**Figure 1** – Diagram of changes hardness HRC in cemented steel from the distance  $h$  to the carbon saturation surface.  $h_{ef}$  and  $h_0$  – effective and total thickness of the cemented layer

Surface hardness and effective  $h_{ef}$  thickness of the cemented layer are regulated to ensure the required service life of the gears [8, 9]. These values determine the technology of hardening of gears and their strength. The distance from the surface to the zone of the layer with hardness 50 HRC is taken as  $h_{ef}$  after hardening [8, 10]. To determine  $h_{ef}$ , the results of measurements of hardness distribution HV0.5 on thin sections along the depth  $h$  of cemented layer of samples are used (Figure 2).



**Figure 2** – Indenter impressions during Vickers hardness measurement on thin sections of a sample of rolled steel 20XH3MA after carburizing, high tempering, hardening from 820 °C and low tempering. Carbon saturated surface of the sample is located on the left side of the figure

Measurements of the hardness distribution of steels and alloys in the area of maximum stresses or in the area of metal failures caused by them are widely used in metal science and mechanical engineering [8–14]. But methods for determining the nature of the change in the properties of the metal with distance to its surface are not productive and not accurate enough. Studies have shown that the presence of a banded structure in the measurement area (Figure 2), as well as due to the inevitable measurement error of HV0.5, the validity of such a determination of  $h_{ef}$  is insufficient. The purpose of this article was to develop a methodology to improve the reliability of determining the effective thickness of the  $h_{ef}$  hardened layer in steel after carburizing and quenching.

## Analysis of the standard method for determining the $h_{ef}$ of a cemented layer

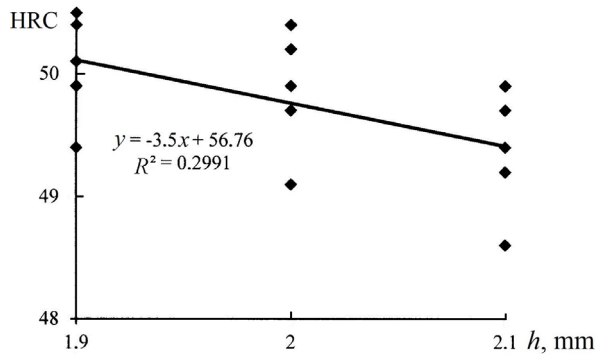
To determine  $h_{ef}$ , multiple measurements of hardness HV0.5 are used on a specially prepared slab of the product, perpendicular to its surface, in the immediate vicinity of the area where the hardness of the metal is close to the value of 50 HRC [10]. The results of HV0.5 measurements are recalculated into HRC hardness values. According to the results of these measurements and recalculation, construct a relationship  $HRC(h)$ . The value of  $h$ , at which the hardness equals 50 HRC [10]. The results of HV0.5 measurements are recalculated into HRC hardness values. According to the results of these measurements and recalculation, construct a relationship  $HRC(h)$ . The value of  $h$ , at which the hardness equals 50 HRC, is considered equal to the value of  $h_{ef}$ . Studies have shown that the presence of a banded structure in the measurement area (Figure 2), as well as due to the inevitable measurement error of HV0.5, the accuracy of such a determination of  $h_{ef}$  is insufficient.

This is illustrated by the results of determining the HRC hardness distribution over the thickness  $h$  of the cemented layer of an experimental sample of 18KhGT steel near the  $h_{ef}$  area (Figure 3).

The equation of the linear trend line of the correlation field of hardness change HRC with distance  $h$  from the cemented surface of the witness sample according to Figure 3 has the following form:

$$HRC = 56.76 - 3.5h(\text{mm}). \quad (1)$$

From (1) the effective thickness  $h_{ef}$  of the cemented layer of the witness sample (for a hardness value of 50 HRC) is 1.931 mm.



**Figure 3** – The results of determining the HRC hardness distribution over the thickness  $h$  of the cemented layer of the experimental sample near the area of  $h_{ef}$

But the reliability of  $R^2$  approximation (square of the  $R$  correlation coefficient between HRC and  $h$ ) of the experimental dependence  $HRC(h)$  by the trend line (1) was only 0.2991. This indicates that the reliability of the determination of the value of  $h_{ef}$  using equation (1) is not high. The results presented in Figure 3 show that increasing the number of hardness measurements in the specified zone, as recommended by the standard method [10], did not lead to an increase in the reliability of determining the  $h_{ef}$ .

### Prerequisite for developing a method to improve the reliability of determining the effective thickness of the cemented layer of steel

In [15] it is shown that the limits of achievable value  $R_{max}$  of correlation coefficient between measurement results and true values of physical quantity are determined not only by the relative error  $\delta$  of its measurement, but also by the relative range  $d$  of its change. Increasing the number of measurements (in the presence of an error of each measurement) in a narrow range  $d$  of variation of the varied parameter practically does not lead to a decrease in the error of determining the correlation between the true values of the physical quantity and the indirect results of its measurement.

To solve this problem, let us take advantage of the fact that an increase in  $d$  with constant  $\delta$  leads to an increase in the achievable  $R_{max}$  correlation coefficient between the measurement results and the true values of the physical quantity [15]. Therefore, approximation of change of the measured physical quantity (in this case – HRC hardness) from the changing parameter (distance  $h$  from the surface) will allow to

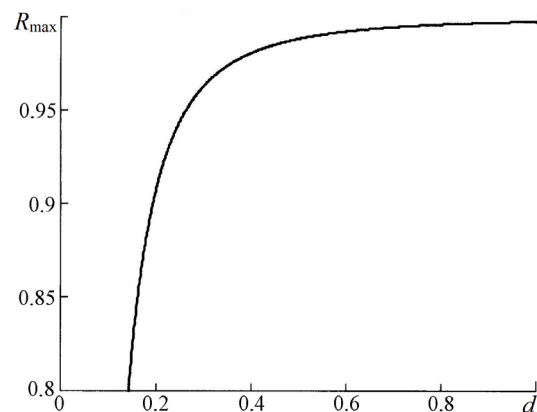
obtain more reliable  $HRC(h)$  dependence when measuring in a wider range of  $h$  parameter change. On the basis of the obtained approximation (with physically correct reflection of the nature of change of the studied dependence), a more accurate value of the parameter  $h$  will be obtained, at which the measured value is equal to the given value of HRC.

To justify this, let us use the obtained in [15] dependence of the achievable coefficient  $R_{max}$  of correlation between the measurement results and the true values  $x$  of the physical quantity on the relative error  $\delta$  of its measurement and the relative range  $d$  of change ( $d = (x_{max} - x_{min})/x_{max}$ ). For the dependence  $R_{max} = R_{max}(\delta, d)$  in the range of  $R_{max} \geq 0.8$  in [15] a formula was developed that approximates this dependence with sufficient accuracy:

$$R_{max} \approx 1 - 0.866\delta^{1.82}d^{-2.25}. \quad (2)$$

In Figure 4 the dependence  $R_{max} = R_{max}(\delta, d)$  is plotted for the value  $\delta = 4\%$ , which is typical for the relative error of HV hardness measurement by Vickers.

The analysis of the dependence  $R_{max} = R_{max}(d)$  presented in Figure 4 showed, for example, that an increase in the parameter  $d$  by 3 times (from 0.2 to 0.6) reduces the difference  $(1 - R_{max})$  by an order of magnitude: from 0.092 to 0.0078. That is, it radically increases the reliability of approximation of the required dependence (coefficient  $R^2$  of “reliability of approximation” increased from 0.824 to 0.984).



**Figure 4** – Dependence of the maximum achievable correlation coefficient  $R_{max}$  between the measurement results and the true values of the physical quantity on the relative range  $d$  of its variation at the relative error of measurement  $\delta = 0.04$ . Calculating by the formula (2)

The increase in the reliability of determining the effective thickness of the cemented layer when using

this approach to its determination will be illustrated by the following example.

### Model sample of 18KhGT steel and the method of measuring its parameters

One of the steels used for the production of medium modulus gears is 18KhGT steel. The sample (30 mm in diameter and 10 mm in thickness) used for research (the results of which are presented in Figure 3 and 5) was subjected to carburizing and hardening according to the regimes regulated by the production of power transmission gears [8]. The distribution of microhardness HV0.5 over the depth of the cemented layer of the sample after chemical treatment was measured on a microhardness sensor PMT-3M at a load of  $4.9\text{N}^1$ . To determine the effective thickness  $h_{ef}$  of the cemented layer of the sample, the measured values of microhardness HV0.5 were recalculated into HV hardness units (at a load of 30 Kg) with a conversion factor of 0.97 [16] and into HRC hardness values according to the formula recommended by the standard<sup>2</sup>:

$$\begin{aligned} \text{HRC} = & 31.49 + 0.0796683 \cdot \text{HV} - \\ & -0.0000355432 \cdot \text{HV}^2 - \frac{6728.16}{\text{HV}}. \end{aligned} \quad (3)$$

The results of recalculation of the measured values of microhardness HV0.5 into HRC hardness values in the range of HRC hardness values of the model sample, which is practically important for determination of the effective  $h_{ef}$  thickness of the cemented layer, are shown in Figure 5. Note that the results of determining the HRC values of the sample at a given value of  $h$  differ significantly for two independent measurements (Figure 5a, b).

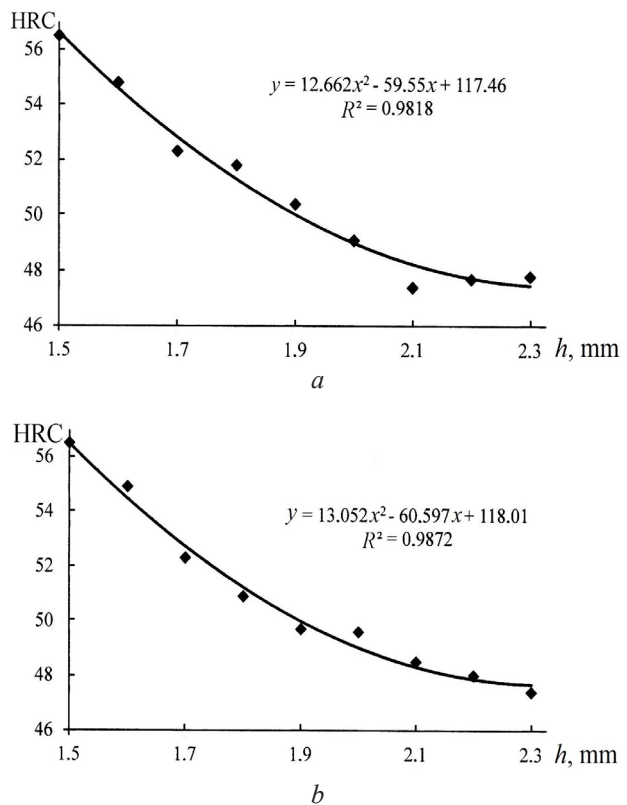
The dependences of  $\text{HRC}(h)$  obtained in Figure 5 dependences were approximated (Figure 5) by second-degree polynomials, respectively:

$$\text{HRC} = 12.662h^2 - 59.55h + 117.46; \quad (4)$$

$$\text{HRC} = 13.052h^2 - 60.597h + 118.01. \quad (5)$$

<sup>1</sup> ISO 6507-1:2005. Metallic materials – Vickers hardness test – Part 1: Test method (IDT)

<sup>2</sup> Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness / Designation: E140 – 07)



**Figure 5** – HRC hardness distributions (recalculated by formula (3) according to the results of HV0.5 hardness measurements) by thickness  $h$  of the cemented layer of the experimental sample (in the nearest and farthest vicinity of the area  $h_{ef}$ ) after hardening. Interpolating their analytical dependences with power regression equations and  $R^2$  coefficients of approximation reliability.  $a, b$  – results of two independent measurements

According to [10] (Figure 1), the value of the effective thickness  $h_{ef}$  of the cemented steel layer after hardening corresponds to the value of 50 HRC. In accordance with this, on the basis of dependences (4) and (5), the following quadratic equations were obtained to determine the  $h_{ef}$  of the sample:

$$h_{ef}^2 - 4.703 \cdot h_{ef} + 5.3278 = 0; \quad (6)$$

$$h_{ef}^2 - 4.6427 \cdot h_{ef} + 5.2107 = 0. \quad (7)$$

The results of solving equations (6) and (7) were, respectively:  $h_{ef} = 1.902\text{ mm}$  and  $h_{ef} = 1.899\text{ mm}$ . They differ from each other by  $0.003\text{ mm}$ , which is significantly less than the allowable error of  $0.02\text{ mm}$  of determination of  $h_{ef}$  in accordance with [10].

The inevitable banding (Figure 2) of the sample and the error in each hardness measurement did not go anywhere. The induced error of the hardness



measurement takes place in every measurement (Figure 5). But, thanks to the methodology used to determine  $h_{ef}$ , these errors have almost no effect on the result of determining  $h_{ef}$ .

## Conclusion

A technique for determining of the effective thickness  $h_{ef}$  of the cemented steel layer by determining its hardness HRC in the expanded vicinity of the  $h_{ef}$ -area, approximating the obtained dependence by a polynomial of the second degree reflecting the character of the HRC hardness of the cemented steel on the distance to its surface in this area, and then solving the square equation obtained with its use, is proposed.

The proposed method provides a significant reduction in the influence of structural striping of the metal and the inevitable error in measuring hardness on the result of  $h_{ef}$  determining. This will allow more accurate setting of cementing regimes of gears increasing their service life under increased loads.

## References

1. Rudenko S.P., Val'ko A.L., Sandomirski S.G. *Primenenie perspektivnyh jekonomno-legirovannyh marok stalej dlja zubchatyh koles mobil'nyh mashin* [Application of Promising Sparingly Alloyed Steels for Gears of Mobile Machines]. *Mehanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2019, no. 4, pp. 61–69 (in Russian).
2. Beskopylny A., Meskhi B., Onishkov N., Kotelnitskaya L., Ananova O. Deep Contact Strength of Surface Hardened Gears. *Metals*, 2020, 10, 600, 18 p. DOI: 10.3390/met10050600
3. Lahtin Ju.M., Leont'eva V.P. *Materialovedenie: Uchebnik dlja mashinostroitel'nyh vuzov* [Material Science: Textbook for Mechanical Engineering Universities]. – 2-e izd., pererab. i dop. – Moskva: Mashinostroyeniye Publ., 1980, 493 p.
4. Susin A.A. *Khimiko-termicheskoe uprochnenie vysokona-pryazhennykh detaley* [Chemical heat reinforcement of highly stressed components]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 1999, 175 p.
5. Yoo C., Yoon S.J., Oh C.Y., Kang B.A. Analysis on the Microstructure and Hardness Change After Carburizing of Chromium-Molybdenum Alloy Steel for Automobile Parts. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 2019, vol. 8, iss. 8, pp. 857–864.
6. Calika A., Duzgunb A., Ekincic A.E., Karakas S., Ucare N. Comparison of Hardness and Wear Behaviour of Boronized and Carburized AISI 8620 Steels. *Acta Physica Polonica A.*, 2009, vol. 116, no. 6, pp. 1029–1032.
7. Mannonov J.A., Imomnazarov S.Q., Ismoilov H.A., Xidirov U.X. Modern Technology Of Surface Hardening Applied To Parts Of The Car. *Nat. Volatiles & Essent. Oils*, 2021, no. 8(4), pp. 2673–2676.
8. Rudenko S.P., Val'ko A.L. *Soprotivlenie kontakt-noj ustalosti cementovannyh zubchatyh koles iz hromonikelevykh stalej* [Contact fatigue resistance of cemented gears made of chromium-nickel steels]. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals], 2017, no 1, pp. 58–62 (in Russian).
9. Mauvoisin G., Bartier O., Nayebi A., Abdi R.El. Determination of the Hardness Profile on Heat Treated Steels by Hole Drilling and Indentation Methods. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 2000, vol. 11, no. 6, pp. 437–455.
10. STB 2307-2013. *Poverhnostno-uprochnennyye sloi metallicheskih detalej. Metody izmerenija tolshhiny* [Surface-strengthened layers of metal parts. Thickness measuring methods]. Minsk: Gosstandart, 2013.
11. Urazov O.V., Egorov V.G., Danilov A.G., Drozdov I.G. *Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh harakteristik kompozicionnyh svarnyh soedinenij ustanovok AJeS, voss-tanovlennyh metodom poverhnostnogo plasticheskogo de-formirovanija* [Study of physical and mechanical characteristics of composite welded joints of nuclear power plant units restored by the surface plastic deformation method]. *Vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta* [Bulletin of the Voronezh State Technical University], 2022, vol. 18, no 3, pp. 124–132 (in Russian).
12. Makarov A.V., Luchko S.N., Shabashov V.A., Volkova E.G., Zamatovskii A.E., Litvinov A.V., Sagradze V.V., Osintseva A.L. Structural and Phase Transformations and Micromechanical Properties of the High-Nitrogen Austenitic Steel Deformed by Shear under Pressure. *The Physics of Metals and Metallography*, 2017, vol. 118, no. 1, pp. 52–64. DOI: 10.1134/S0031918X17010045
13. Bulychev S.I., Maljutin V.M., Uzincev O.E. *Opređenje mekhanicheskikh svojstv po tverdosti na os-nove osnovnyh parametrov podobija. Plasticheskaja de-formacija v otpechatke* [Determination of Mechanical Properties by Hardness Based on Basic Similarity Parameters. Plastic Deformation in an Imprint]. *Deformacija i razrushenie materialov* [Deformation and fracture of materials]. EDN: KNLVGN, 2006, no. 5, pp. 19–23 (in Russian).
14. Saakjan M.G., Sogomonjan V.K. *Izmerenie mi-krotverdosti v zonah ustalostnogo razrushenija valov*

[Measurement of Microhardness in the Fatigue Fracture Zones of Shafts]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta Armenii. Serija: Mehanika, mashinovedenie, mashinostroenie* [Bulletin of the State University of Armenia. Series: Mechanics, Mechanical Engineering, Mechanical Engineering], 2013, no. 2, pp. 64–69 (in Russian).

15. Sandomirski S.G. Effect of Measurement Accuracy and Range of Variation of a Physical Quantity on the Correlation Coefficient. *Measurement Techniques*, 2015,

vol. 57, iss. 10, pp. 1113–1120.

**DOI:** 10.1007/s11018-015-0588-3

16. Val'ko A.L., Rudenko S.P., Sandomirski S.G. *Perevod chisel tverdosti pri ispytaniyah poverhnostno-uprochnennyh stal'nyh izdelij* [Translation of Hardness Numbers in Testing of Surface-Hardened Steel Products]. *Lit'e i metallurgija* [Foundry Production and metallurgy], 2022, no. 3, pp. 73–78.

**DOI:** 10.21122/1683-6065-2022-3-64-69

# ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

8. У графиков, имеющих числовые значения по осям, рамки должны быть открыты, а засечки направлены внутрь рамки. На рисунках, представляющих собой графики зависимостей, не следует делать размерную сетку, следует дать лишь засечки на осях, причем все засечки должны быть оцифрованы. Если оси на рисунках оцифрованы, то они завершаются на позиции очередной засечки, где засечка не ставится, а вместо числовых значений даются обозначения переменной и единица измерения. Если оси не оцифровываются, то они завершаются стрелками, рядом с которыми даются обозначения переменных без единиц измерения.

9. Полутонные фотографии приборов или их частей представляются при публикации в тех случаях, когда они несут существенную информацию, которую нельзя выразить иным способом. Фотографии должны быть высококачественными, контрастными, с хорошо различимыми деталями.

10. Иллюстрации (графики, диаграммы, схемы, чертежи), рисованные средствами MS Office, должны быть контрастными и чёткими. Недопустимо нанесение средствами MS Word каких-либо элементов поверх вставленного в файл рукописи рисунка (стрелки, подписи) ввиду большого риска их потери на этапах редактирования и вёрстки. Иллюстрации должны иметь размеры, соответствующие их информативности: 8–8,5 см (на одну колонку), 17–17,5 см (на две колонки) или 23 см (во весь лист). Поэтому желательно изображать отдельные элементы и надписи на рисунке так, чтобы при уменьшении масштаба рисунка до одного из указанных размеров буквы и цифры приобрели высоту 2–2,5 мм, элементы схем 3–5 мм, отдельные точки 1 мм, а линии должны быть при этом разнесены на расстояние не менее 0,5–1 мм.

11. Надписи и обозначения на иллюстрациях следует располагать так, чтобы они не соприкасались ни с какими её частями. На задний план иллюстрации желательно не добавлять серый (цветной) фон или сетки.

12. Таблицы не должны дублировать графики. Каждая таблица имеет заголовок. На все таблицы

# ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

---

и рисунки следует давать ссылки в тексте. Таблицы не должны содержать вертикальные линии, делящие таблицу на столбцы. Название и содержание таблиц представляется на русском и английском языках.

13. Обозначения и сокращения, принятые в статье, расшифровываются непосредственно в тексте.

14. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

15. Набор формул должен проводиться в редакторе MathType целиком. Набор формул из составных элементов не допускается, номера формул – по правому краю. Нумеруются лишь формулы, на которые есть ссылки в тексте.

16. Необходимо использовать следующие установки редактора формул. Размеры: полный – 10 пт, подстрочный – 9 пт, под-подстрочный – 7 пт, символ – 14,5 пт, подсимвол – 12,5 пт. Стили: текст, функция, число, кириллица – шрифт «Times New Roman», вектор-матрица – шрифт «Times New Roman», жирный; греческий малый, греческий большой, символ – шрифт «Symbol», прямой; переменная – шрифт «Times New Roman», курсив.

17. Отдельные строчные буквы и специальные символы набираются в тексте гарнитурой Symbol **без использования редактора формул**. При наборе формул и буквенных обозначений необходимо учитывать следующие правила: **русский алфавит не используется**; греческие буквы, математические символы (grad, div, ln, min, max и др.), единицы измерения (Вт, Дж, В, кг и др.), кириллические буквы, сокращения от русских слов ( $q_{cp}$ ); обозначения химических элементов и соединений (в т. ч. в индексе) набираются **прямо**; латинские буквы – переменные и символы физических величин (в т. ч. в индексе) набираются **курсивом**; векторы – жирным шрифтом (стрелки вверх не ставятся).

18. Начертание обозначений в формулах и в основном тексте должно быть полностью идентично. В расшифровке формул, которая начинается словом «где»,

символы и их порядок должны соответствовать символам и их порядку следования в формулах.

19. Список использованных источников составляется в порядке упоминания ссылок по тексту, должен содержать полные библиографические данные и приводится в конце статьи. Не рекомендуется давать ссылки на материалы конференций, статьи из электронных журналов без идентификатора DOI, учебные пособия, интернет-ресурсы. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Желательно, чтобы количество ссылок было не менее 10; самоцитирование – не более 20 %.

20. Авторы на отдельной странице предоставляют о себе следующие сведения: фамилия, имя, отчество, ученая степень и звание, место работы и занимаемая должность, адрес электронной связи.

21. Статьи, излагающие результаты исследований, выполненных в учреждениях, должны иметь соответствующее разрешение на опубликование в открытой печати.

22. При необходимости в конце основного текста указываются наименование фонда, оказавшего финансовую поддержку, или уровень и наименование программы, в рамках которой выполнена работа, на русском и английском языках.

23. Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, ранее уже опубликованных или принятых к печати другими изданиями.

24. Статьи, не соответствующие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются и возвращаются авторам. Датой поступления считается день получения редакцией первоначального варианта текста.

25. Редакция предоставляет возможность первоочередного опубликования статей лицам, осуществляющим послевузовское обучение (аспирантура, докторантура, соискательство), в год завершения обучения; не взимает плату с авторов за опубликование научных статей; оставляет за собой право производить редакторские правки, не искажающие основное содержание статьи.



# AUTHOR GUIDELINES

---

1. Article materials should correspond to the journal profile and be clearly written.

2. An article should be submitted in Russian or English and will be published in its original language.

3. Articles received by the Editorial Board will be reviewed by 2 specialists. The main criteria of acceptance are theme actuality, information value, and scientific novelty.

4. All materials should be submitted in two hard copies together with electronic file in the Word for Windows format (97/2000/2003). The paper should not exceed 14 pages of the typewritten text (Times New Roman, 12 points, 1.5-space).

5. The article should contain UDC number, Title (printed in capitals), Authors' names (the corresponding author name should be marked with asterisk), full Address of organization(s) in which the author(s) work, Abstract (200–250 words), Keywords (not more than 5 words), Introduction, the Text of the paper with tables, diagrams and figures (if there are any), Conclusion with clearly stated inferences, List of References, List of Symbols and Abbreviations (if it is necessary). Title, Authors' names and affiliation(s), Abstract, Keywords should be presented both in English and Russian languages.

6. The abstract should be informative (contain "squeeze" from all sections of the article – the introduction stating the purpose of the work, methods, main part and conclusion).

7. Figures should be black-and-white, represented in graphical formats tif, attached with Excel or MS Graph and added with captions. All symbols in figures should be described.

8. Tables should be placed directly in the article body. Diagrams and tables should not contain the same information. Each table should have the title. All tables, diagrams and figures should be referenced in the text.

9. Symbols and abbreviations which are used in articles should be deciphered directly in the text and also (if necessary) taken out on a separate page.

10. Dimensions of all quantities used in the article should correspond to International System of Units.

11. Formulas should be typed in MathType.

12. List of References is to be placed at the end of the article with full bibliographic information. Order of references should correspond to the order of their occurrence in the text. It is not recommended to refer to conference proceedings, papers from electronic journals without DOI number, textbooks, internet resources. References on unpublished works are prohibited. It is recommended to refer to not less than 10 references, self-citations – not more than 20 %.

13. The following information about every co-author should be presented: family name, first name, patronymic (or second) name (if there are any), scientific degree and title, organization and position, full address with the postal code for correspondence, office or mobile phone numbers, fax, e-mail.

14. Articles containing investigation results obtained in organizations should have a corresponding permission for publication.

15. Names of Foundations or Programs financially granted the research may be acknowledged in the end of the text.

16. Authors are responsible for submitting articles previously published or accepted by other publisher.

17. Articles not meeting the requirements of the Editorial Board would not be accepted and may be returned to the authors. The date of receipt is considered to be the day when the Editorial Board receives the author's original paper.

18. Authors conducting postgraduate (graduate studies, doctoral studies) have a priority in publishing their articles out of queue in the year of completion. Authors do not pay for publishing scientific articles. The Editorial Board can shorten and/or change the text if it does not strain the meaning of the article.

---