



ЕВРОПЕЙСКИ СЪЮЗ
ЕВРОПЕЙСКИ
СОЦИАЛЕН ФОНД
ЕВРОПЕЙСКИ ФОНД
ЗА РЕГИОНАЛНО РАЗВИТИЕ



ОПЕРАТИВНА ПРОГРАМА
ИНОВАЦИИ И
КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ

„МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“

26 септември 2025

Габрово



ЕВРОПЕЙСКИ СЪЮЗ
ЕВРОПЕЙСКИ СТРУКТУРНИ И
ИНВЕСТИЦИОННИ ФОНДОВЕ

Изпълнителна агенция
„Програма за образование“



ОПЕРАТИВНА ПРОГРАМА
НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ ЗА
ИНТЕЛИГЕНТЕН РАСТЕЖ

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE

„MECHATRONIC, ECO- AND ENERGY SAVING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES“

PROCEEDINGS

**26 SEPTEMBER 2025
GABROVO**

The conference is held on:

Project **BG16RFPR002-1.014-0005** Centre of Competence “**Smart Mechatronic, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies**”, financed by the Operational Programme “Science and education for smart growth”, co-financed by the European Union through the European Structural and Investment Funds

www.eufunds.bg



ЕВРОПЕЙСКИ СЪЮЗ
ЕВРОПЕЙСКИ СТРУКТУРНИ И
ИНВЕСТИЦИОННИ ФОНДОВЕ

Изпълнителна агенция
„Програма за образование“



ОПЕРАТИВНА ПРОГРАМА
НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ ЗА
ИНТЕЛИГЕНТЕН РАСТЕЖ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ

„МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“

СБОРНИК ДОКЛАДИ

**26 СЕПТЕМВРИ 2025
ГАБРОВО**

Конференцията се провежда по:

Проект BG16RFPR002-1.014-0005 - Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“, финансиран от Оперативна програма „Наука и образование за интелигентен растеж“, съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейските структурни и инвестиционни фондове.

www.eufunds.bg

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ МЕЕСТ'25

СБОРНИК ДОКЛАДИ

Университетско издателство “Васил Априлов” – Габрово

ISSN: 2815-4924



**МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ
„МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“
ГАБРОВО 25**

**по проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност
„Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“**

Габрово, 26 септември 2025 година

Организационен комитет:

Председател: доц. д-р инж. Драгомир Василев - ТУ-Габрово, България

Членове: доц. д-р Лиляна Русанова - ТУ-Габрово, България

Програмен комитет:

Председател: проф. д-р инж. Илия Железаров - ТУ-Габрово, България

Членове: акад. Чавдар Руменин - Институт по роботика, БАН, София, България

акад. Тони Спасов - СУ „Св. Кл. Охридски“ ФХФ, България

чл. кор. Красимир Данов - СУ „Св. Кл. Охридски“ ФХФ, България

проф. дн инж. Иван Кралов - ТУ-София, България

проф. д-р инж. Вълчо Николов - ТУ-София, Филиал-Пловдив, България

проф. д-р инж. Михаил Петров - ТУ-София, Филиал-Пловдив, България

проф. д-р инж. Андон Топалов - ТУ-София, Филиал-Пловдив, България

проф. д-р инж. Гриша Спасов - ТУ-София, Филиал-Пловдив, България

проф. дфн Румен Каканаков - ЦЛПФ, БАН-Пловдив, България

проф. д-р Лиляна Колаклиева - ЦЛПФ, БАН-Пловдив, България

проф. дтн Таньо Танев - Институт по роботика, БАН, София, България

проф. д-р Кръстанка Маринова - СУ „Св. Кл. Охридски“ ФХФ, България

проф. д-р Август Иванов - Институт по роботика, БАН, София, България

проф. д-р Николай Ганев – Чешки технически университет, Прага, Чехия

проф. д-р Драган Антич - Университет Ниш, Сърбия

проф. д-р Йован Степанович - Университет Ниш, Сърбия

проф. д-р Душан Трайкович - Университет Ниш, Сърбия

проф. д-р Мирослав Зетек - Университет на Западна Бохемия, Пилзен, Чехия

доц. д-р Ивана Зеткова - Университет на Западна Бохемия, Пилзен, Чехия

доц. д-р Татяна Куцарова - Институт по електроника, БАН, София, България

доц. д-р Стефан Вълков - Институт по електроника, БАН, София, България

доц. д-р инж. Ивайло Неделчев - ТУ-Варна, България

доц. д-р Егнар Йоздикилилер – Технически университет – Истанбул, Р.Турция

проф. дтн инж. Райчо Иларионов - ТУ-Габрово, България

проф. дтн инж. Йордан Максимов - ТУ-Габрово, България

проф. дн. инж. Галя Дунчева - ТУ-Габрово, България

проф. д-р инж. Ирина Александрова - ТУ-Габрово, България

проф. д-р инж. Звездица Ненова - ТУ-Габрово, България

проф. дн инж. Димитър Дичев - ТУ-Габрово, България

проф. д-р инж. Николай Маджаров - ТУ-Габрово, България

проф. д-р инж. Тошко Ненов - ТУ-Габрово, България

проф. д-р инж. Ангел Анчев - ТУ-Габрово, България

CONTENTS

AUTOMATED CALIBRATION OF INFRARED THERMOMETERS VIA FLUKE 4181 CALIBRATOR AND LABVIEW-BASED APPLICATION	11
Stefan Ivanov <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
MULTICONNECTED MICELLAR PHASES FOR CLEANING APPLICATIONS	17
Tatiana Slavova, Krastanka Marinova, Krassimir Danov <i>Sofia University "St. Kliment Ohridski", Sofia, Bulgaria</i>	
HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN CONVECTIVE HEAT EXCHANGERS	23
Plamen Bonev, Valentin Petkov <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
A SENSOR NETWORK FOR URBAN PARTICULATE MATTER MONITORING	30
H. Zhivomirov, I. Nedelchev <i>Technical University of Varna, Bulgaria</i>	
CONSTRUCTION AND COMMISSIONING OF A HYDROACOUSTIC MEASURING BUOY IN THE AQUATORY OF VARNA BAY	36
I. Nedelchev, H. Zhivomirov <i>Technical University of Varna, Bulgaria</i>	
ANALYSIS OF THE ASSEMBLY SYSTEM FAS 200 AT LABORATORY OF INTELLIGENT AUTOMATED MANUFACTURING	42
Albena Taneva, Michail Petrov <i>Technical University of Sofia, Bulgaria</i>	
NEW TRENDS OF DEVELOPMENT IN THE LABORATORY ON INTELLIGENT MANUFACTURING SYSTEMS	48
Albena Taneva, Michail Petrov <i>Technical University of Sofia, Bulgaria</i>	
THE LABORATORY C 7.6 "INTELLIGENT ENERGY SAVING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES" AT THE CC "INTELLIGENT MECHATRONIC, ECO AND ENERGY SAVING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES"	55
Stanimir Stefanov <i>Technical University – Sofia, Plovdiv branch, Bulgaria</i>	
PROSPECTS FOR DEVELOPMENT OF LABORATORY C 7.6 "INTELLIGENT ENERGY SAVING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES" AT THE CC "INTELLIGENT MECHATRONIC, ECO AND ENERGY SAVING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES"	61
Stanimir Stefanov <i>Technical University – Sofia, Plovdiv branch, Bulgaria</i>	

ACHIEVEMENTS AND SUSTAINABILITY OF ACTIVITIES IN THE LABORATORY “ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES FOR LIFE CYCLE EXTENSION AND IMPROVEMENT OF OPERATIONAL RELIABILITY“	67
Angel Anchev <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
RESEARCH OF A WIRELES POWER TRANSFER SYSTEM FOR CHARGING ELECTRIC VEHICLES AT DIFFERENT BATTERY DISCHARGE LEVELS	74
Nikolay Madzharov, Desislav Iliev <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
BUILDING A SYSTEM FOR COLLECTING AND ANALYZING DATA IN REAL	81
Petya Pavlova, Boryana Pachedjieva, Ivailo Atanasov, Dobrinka Petrova <i>Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies", Plovdiv, Bulgaria</i>	
A REAL-TIME SYSTEM FOR EXTRACTION AND ESTIMATION THE PARAMETERS OF NATURAL PHENOMENA IN VIDEO FILES	88
Petya Pavlova, Boryana Pachedjieva, Ivailo Atanasov, Dobrinka Petrova <i>Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies", Plovdiv, Bulgaria</i>	
DESIGN OF INTERACTIVE TECHNOLOGIES BASED ON COGNITIVE PRINCIPLES	94
Maya Dimitrova, Tanio Tanev, Ivan Chavdarov <i>Institute of Robotics, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria</i>	
MODELING OF A HEATING AND DOMESTIC HOT WATER SYSTEM.....	100
Plamen Penchev <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
LOW-TEMPERATURE PVD DEPOSITION AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF CR-N COATING ON P6M5 HIGH-SPEED STEEL.....	106
Chavdar Pashinski <i>Technical University – Sofia, Plovdiv branch, Bulgaria</i>	
RESEARCH AND DEVELOPMENT OF POSITIONAL SYSTEM FOR LASER SURFACE HARDENING OF COMPLEX 3D SURFACES.....	112
Prodan Prodanov, Borislav Stoyanov <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
TEMPERATURE-INDUCED FORMATION OF A BICONTINUOUS PHASE: CRYO-TEM VISUALIZATION AND CAHN–HILLIARD INTERPRETATION	118
Mihail Georgiev, Lyuben Mihaylov, Evelina Vasileva <i>Sofia University “St. Kliment Ohridski”, Sofia, Bulgaria</i>	
LABORATORY OF INNOVATIVE NANOSTRUCTURED MATERIALS – SCIENCE, TECHNOLOGY, AND FUTURE PERSPECTIVES	123
Tsveta Sarafska, Zlatina Zlatanova, Tony Spassov <i>Sofia University “St. Kliment Ohridski”, Sofia, Bulgaria</i>	

LIGHTING MEASUREMENTS IN AN ACCREDITED LABORATORY OF THE MEASUREMENT, TESTING AND CALIBRATION LABORATORY COMPLEX AT TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO.....	130
Plamen Tsankov, Ivaylo Stoyanov, Hristo Ibrishimov, Milko Yovchev, Ivaylo Lazarov <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
PERFORMANCE MONITORING OF A GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC POWER PLANT IN GABROVO TECH PARK.....	137
Plamen Tsankov, Ivaylo Lazarov, Hristo Ibrishimov, Milko Yovchev <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
EFFECT OF COOLING REGIMES ON THE MICROSTRUCTURE OF AUSTENITIC MANGANESE STEEL ALLOYED WITH NICKEL AND MOLYBDENUM.....	143
Vladimir Dunchev, Vladimir Todorov, Milka Atanasova, Marieta Ivanova <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
APPLICATIONS OF SCANNING ELECTRON MICROSCOPES AND X-RAY DIFFRACTOMETERS IN MATERIALS SCIENCE AND METALLURGY.....	148
Vladimir Dunchev, Vladimir Todorov, Milka Atanasova, Marieta Ivanova <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
ELECTRON BEAM SURFACE TREATMENT AND WELDING AT THE CENTRE OF COMPETENCE “SMART MECHATRONIC, ECO- AND ENERGY- SAVING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES.....	153
Stefan Valkov^{1,2}, Georgi Kotlarski¹, Nikolay Nedyalkov¹, Tatyana Koutzarova¹, Maria Ormanova^{1,2}, Borislav Stoyanov², Ivana Ilievska¹ ¹ <i>Institute of Electronics, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria</i> ² <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
ADVANCED RESEARCH DIRECTIONS IN ELECTRON BEAM WELDING AND SURFACE MODIFICATION OF METALLIC ALLOYS AT THE CENTRE OF COMPETENCE “SMART MECHATRONIC, ECO- AND ENERGY- SAVING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES“.....	160
Stefan Valkov^{1,2}, Georgi Kotlarski¹, Nikolay Nedyalkov¹, Tatyana Koutzarova¹, Maria Ormanova^{1,2}, Borislav Stoyanov², Ivana Ilievska¹ ¹ <i>Institute of Electronics, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria</i> ² <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
INVESTIGATION OF THE MICROSTRUCTURE AFTER ELECTRON BEAM WELDING OF DUCTILE CAST IRON AND AISI 316L STAINLESS STEEL.....	165
Milka Atanasova, Vladimir Todorov, Marieta Ivanova, Vladimir Dunchev <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
EXPERIMENTAL AERODYNAMIC STUDIES WITH PIV METHODS.....	170
Hristian Panayotov, Stanimir Penchev, Martin Zikyamov <i>Technical University – Sofia, Plovdiv branch, Bulgaria</i>	
COORDINATE MEASUREMENTS AND ERROR COMPENSATION METHODS IN INDUSTRIAL APPLICATIONS.....	176
Dimitar Dichev, Iliya Zhelezarov, Borislav Georgiev, Tsanko Karadzhov <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	

ROBOTICS AND MECHATRONICS: FOUNDATIONS FOR SOCIAL, COLLABORATIVE, AND INTERACTIVE HUMAN–ROBOT SYSTEMS — A LABORATORY SUMMARY REPORT	184
Tanio Tanev <i>Institute of Robotics, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria</i>	
AUTOMOTIVE MECHATRONIC SYSTEMS LABORATORY 2018-2023	191
Krasimir Ambarev, Stiliyana Taneva, Valyo Nikolov <i>Technical University – Sofia, Plovdiv branch, Bulgaria</i>	
AUTOMOTIVE MECHATRONIC SYSTEMS LABORATORY 2024-2029	202
Krasimir Ambarev, Stiliyana Taneva, Valyo Nikolov, Tsvetana Grigorova, Ivan Maradzhiev <i>Technical University – Sofia, Plovdiv branch, Bulgaria</i>	
HYBRID RESEARCH AND APPLICATION LABORATORY PLATFORM FEATURING INDUSTRIAL ROBOTICS AND CNC MANUFACTURING TECHNOLOGIES.....	210
Tihomir Stoyanov, Sevil Ahmed-Shieva, Nikola Shakev, Katya Madzharova-Atanasova, Tanya Titova-Kosturkova, Borislav Penev, Radoslav Hrishev, Andon Topalov <i>Technical University – Sofia, Plovdiv branch, Bulgaria</i>	
LABORATORY „INTEGRATED SYSTEMS FOR DESIGN AND PRODUCTION IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY“ 2018-2023	217
Valyo Nikolov, Pepo Yordanov <i>Technical University – Sofia, Plovdiv branch, Bulgaria</i>	
DISPERSE SYSTEMS AND RHEOLOGY IN CLEAN TECHNOLOGIES – LAB 6.2 CAPABILITIES AND DEVELOPMENTS.....	225
Krassimir Danov, Rumyana Stanimirova, Mihail Georgiev, Krastanka Marinova <i>Sofia University “St. Kliment Ohridski”, Sofia, Bulgaria</i>	
TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF THE EQUIPMENT IN THE LABORATORY C 1.3. “ADDITIVE AND ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT”	232
Hristian Mitev, Yosif Mitev, Hristo Radev, Hristo Metev, Irina Aleksandrova <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
APPLICATION OF ADDITIVE METHODS IN TOOL MANUFACTURING	237
Hristian Mitev, Yosif Mitev, Hristo Radev, Hristo Metev, Irina Aleksandrova <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
DIAGNOSTICS OF AUTONOMOUS MOBILE ROBOTS	243
Vanya Markova, Ventseslav Shopov <i>Institute of Robotics, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria</i>	
FORMATION CONTROLS THROUGH TRAINING WITH REINFORCEMENT LEARNING.....	247
Vanya Markova, Ventseslav Shopov <i>Institute of Robotics, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria</i>	

ACTIVE MICROGRID IN AN URBAN LOCATION - LOW VOLTAGE POWER QUALITY INDICATORS	252
Dimitrina Koeva, Lyubomir Dimitrov, Georgi Bankov <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
IMPACT OF HOUSEHOLD ELECTRICITY CONSUMERS ON THE POWER FACTOR IN LOW-VOLTAGE GRIDS	258
Lyubomir Dimitrov, Dimitrina Koeva <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
STUDYING THE EFFECT OF GEOMETRY AND DEFORMATION FORCE ON THE ROUGHNESS OF THE MACHINED SURFACE OF CUZN39PB3 BRASS, AFTER SURFACE PLASTIC DEFORMATION WITH TOOLS FROM "FERROTIC C"	264
Kalin Anastasov, Petya Daskalova <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF A 5-AXIS TURNING CENTER.....	271
Hristo Yakimov <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
SENSORS AND SENSOR SYSTEMS – DEVELOPMENT AND RESEARCH.....	276
Toshko Nenov <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
APPLICATIONS OF LOW-RESOLUTION IR ARRAY SENSORS FOR INDOOR HUMAN ACTIVITY DETECTION AND RECOGNITION.....	284
Galidiya Petrova, Hristo Radev, Dimitar Yankov, Georgi Bodurov <i>Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"</i>	
SCANNING ELECTRON MICROSCOPY – A KEY FACTOR IN THE DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL NANOTECHNOLOGIES FOR COATINGS.....	293
Lilyana Kolaklieva, Vasilliy Chitanov, Stefan Kolchev, Ekaterina Zlatareva, Tetiana Cholakova, Denis Faik, Roumen Kakanakov <i>Central Laboratory of Applied Physics, Bulgarian Academy of Sciences</i>	
EVOLUTION OF ELECTROMOBILITY	299
Raycho Ilarionov, Ivan Simeonov, Hristo Kilifarev, Egnar Özdikililer, Borislav Nedev <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
PLANNED RESEARCH UNDER WORK PACKAGE C7.1 METHODS AND MEANS FOR SOLVING ENERGY AND INFRASTRUCTURE PROBLEMS RELATED TO THE MASS ELECTRO-MOBILITY.....	304
Raycho Ilarionov, Ivan Simeonov, Hristo Kilifarev, Egnar Özdikililer, Borislav Nedev <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
RESEARCH AND MODELING OF THE INFLUENCE OF CUTTING PARAMETERS ON THE ROUGHNESS OF THE MACHINED SURFACE WHEN TURNING CUZN39PB3 BRASS.....	311
Kalin Anastasov, Petya Daskalova <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

АВТОМАТИЗИРАНО КАЛИБРИРАНЕ НА ИНФРАЧЕРВЕНИ ТЕРМОМЕТРИ ЧРЕЗ КАЛИБРАТОР FLUKE 4181 И ПРИЛОЖЕНИЕ, БАЗИРАНО НА LABVIEW

AUTOMATED CALIBRATION OF INFRARED THERMOMETERS VIA FLUKE 4181 CALIBRATOR AND LABVIEW-BASED APPLICATION

Stefan Ivanov

Technical University of Gabrovo

Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract

This paper presents a comprehensive methodology for the calibration of infrared thermometers using a dedicated IR sensor calibrator (Fluke 4181) and a custom-developed LabVIEW software application. The proposed approach enables automated comparison between the reference temperature set on the calibrator and the readings obtained from the infrared thermometer. Linear calibration functions are derived through first-order polynomial regression, with the resulting Gain and Offset coefficients stored in JSON files for subsequent application. Multiple calibration functions can be defined for different temperature ranges to further enhance measurement accuracy. Experimental results demonstrate the effectiveness of the method, with post-calibration deviations minimized within permissible limits. The developed system combines precision, flexibility, and user-friendliness, making it suitable for both laboratory and industrial applications where accurate non-contact temperature measurements are critical.

Keywords: infrared thermometer, IR sensor calibration, multi-point calibration, linear regression, non-contact temperature measurement

1. INTRODUCTION

Infrared (IR) sensors are an indispensable component of modern non-contact temperature measurement systems, with widespread applications in industry, medicine, environmental monitoring, and defense. Their sensitivity to infrared radiation enables precise detection of temperature variations without the need for physical contact with the object under observation. This makes them particularly valuable in environments where direct measurement is difficult or impossible [1].

Despite their high measurement accuracy, IR sensors are subject to variations arising from

manufacturing tolerances, environmental influences, and long-term use. Such factors can cause deviations in the measured values, highlighting the necessity for reliable and traceable calibration [2]. Calibration ensures the correspondence between the sensor's output signal and the actual physical quantity by employing standardized radiation sources, such as so-called "black bodies" [1]. A particular challenge is calibration in the temperature range close to ambient conditions, where the influence of the surrounding environment is significant. In such cases, traditional compensation methods

are often insufficient due to inaccuracies in emissivity or discrepancies between theoretical models and real-world conditions. To address this, modern approaches propose the use of equivalent blackbody functions at different ambient temperatures [3].

Calibration is not only a physical but also a statistical process. The optimal construction of calibration curves requires careful planning, error evaluation, and the application of linear or nonlinear regression, depending on the sensor's characteristics [4]. This involves selecting an appropriate number of standard samples, ensuring reproducibility of measurements, and analyzing residuals to confirm the adequacy of the chosen model.

In practice, calibration requires the sensor readings to be compared with those of a reference sensor or a higher-class measurement instrument. In this study, a Fluke 4181 calibrator is employed [5,6]. The objective of the present research is to demonstrate the implementation of an infrared thermometer calibration procedure.

2. MULTI-POINT SENSOR CALIBRATION

The calibration of measuring instruments represents a fundamental element in most measurement methodologies. Through this process, the relationship is established between the measurement data obtained from the system (e.g., the readings of a given instrument) and the reference values provided by calibration standards (e.g., the quantity of the investigated substance). In many analytical approaches, calibration is an indispensable step that typically involves preparing a series of standards with precisely known quantities of the target component, recording the instrument response for each standard, and constructing a curve that describes the relationship between the instrument's response and the component's concentration.

One widely used calibration method is based on determining a linear calibration function from a set of measured reference points. Although a linear function cannot compensate for nonlinear variations in the readings of the calibrated sensor, such nonlinearities are relatively uncommon; therefore, the linear model provides a reliable and practical solution for the calibration process.

A linear calibration function can be expressed as:

$$y = \text{Gain} \times x + \text{Offset}, \quad (1)$$

where x represents the input signal, y denotes the output result, Gain (also referred to as Slope) is the amplification coefficient, and Offset (also referred to as Intercept) is the constant shift.

The linear calibration function is determined through regression analysis and mathematically describes the dependence between input and output data, based on multiple reference values. An example of such a linear calibration curve, derived from reference input data, is illustrated in Figure 1.

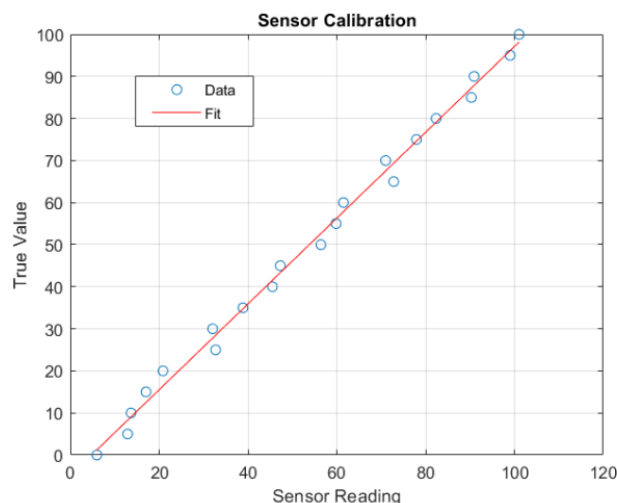


Figure 1. Example of a linear calibration function derived from reference data

Another important parameter is the so-called residuals. These represent the differences between the actual measured values and the values predicted by the model. If the residuals are small, random, and uniformly distributed around the horizontal axis (Figure 2), it is generally accepted that the linear calibration function provides a good fit to the data and effectively performs the calibration of the corresponding sensor.

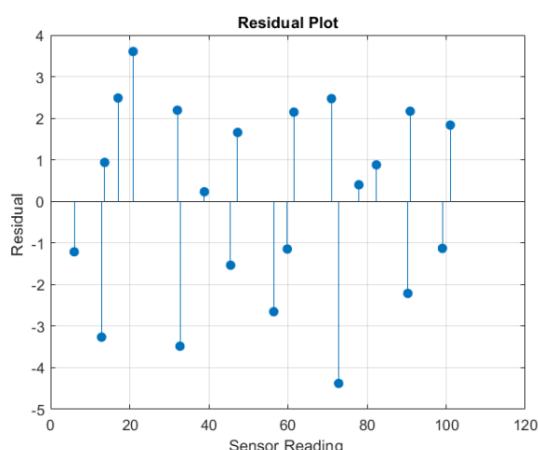


Figure 2. Distribution of residuals around the calibration line

3. FLUKE 4181 INFRARED TEMPERATURE SENSOR CALIBRATOR

The calibration of infrared sensors requires the use of specialized calibrators that generate a uniform and well-defined temperature across a test surface, which is then measured by the infrared sensor.

The Fluke 4181 calibrator provides an ideal solution for the calibration of infrared thermometers and thermal imaging cameras within their operating temperature range. The instrument offers a temperature range from 35 °C to 500 °C. Uniformity of the generated surface temperature is a critical factor in infrared calibration, since an infrared

thermometer “views” the entire target surface when positioned at the appropriate calibration distance.

With an accuracy of ± 0.35 °C, the Fluke 4181 is capable of achieving its performance specifications without the need for additional corrections related to emissivity. The main technical specifications of the calibrator, as provided in its datasheet, are summarized in Table 1.

Table 1. Key technical specifications of the Fluke 4181 infrared calibrator

Specifications	4181
Temperature range (@ 23°C ambient, 0.95 emissivity)	35°C to 500°C
Display accuracy ¹	± 0.35 °C at 35°C ± 0.50 °C at 100°C ± 0.70 °C at 200°C ± 1.20 °C at 350°C ± 1.60 °C at 500°C
Stability	± 0.05 °C at 35°C ± 0.20 °C at 200°C ± 0.40 °C at 500°C
Uniformity (5.0 in dia of center of target) ²	± 0.10 °C at 35°C ± 0.50 °C at 250°C ± 1.00 °C at 500°C
Uniformity (2.0 in dia of center of target) ²	± 0.10 °C at 35°C ± 0.25 °C at 250°C ± 0.50 °C at 500°C
Heating time	45 min: 35° C to 500° C
Cooling time	100 min: 500°C to 35°C 40 min: 500°C to 100°C
Stabilization time	10 minutes
Nominal emissivity ³	0.95
Thermometer emissivity compensation	0.9 to 1.0
Target diameter	152.4 mm (6 in)

Figure 3 presents the external view of the Fluke 4181 infrared calibrator employed at the Center of Competence, Technical University – Gabrovo.



Figure 3. View of the Fluke 4181 infrared calibrator employed at the Center of Competence, Technical University – Gabrovo

4. INFRARED THERMOMETER USED FOR CALIBRATION

The infrared calibrator can be employed for the calibration of various infrared thermometers and temperature sensors. Such IR thermometers are commercially available at relatively low cost (Figure 4).



Figure 4. Example of a commercially available infrared thermometer used in the calibration process

Their low cost implies that, in terms of measurement accuracy and repeatability, some errors in temperature determination can be expected. Therefore the role of the infrared calibrator becomes essential, as it enables the determination of a linear calibration function, which can significantly improve the measurement accuracy of such IR thermometers.

5. DEVELOPMENT OF AN LABVIEW APPLICATION FOR MULTI-POINT CALIBRATION OF INFRARED THERMOMETERS

To determine the calibration coefficients describing the linear calibration function, a LabVIEW application was developed. The application records the measurements obtained from the infrared thermometer for each actual temperature value set on the calibrator. It allows the use of up to five different temperature points defined on the calibrator, with up to five measurements from the IR sensor per point. For the minimal requirements to determine the linear calibration function, only two actual temperature points and a single measurement per point are sufficient.

In the application, the actual temperature values correspond to the set temperatures of the calibrator, while the measured values correspond to the readings of the IR thermometer for these actual temperatures (Figure 5).

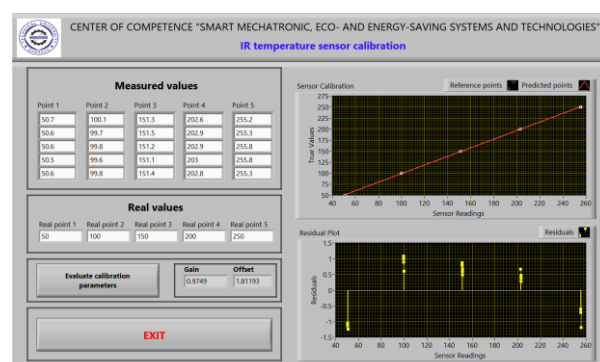


Figure 5. LabVIEW application interface for recording measured and actual temperatures for multi-point IR thermometer calibration.

By pressing the button to calculate the coefficients of the linear calibration function, the application performs a first-order polynomial fit to the input data. The resulting polynomial coefficients correspond to the Gain and Offset values of the linear calibration function. These coefficients are saved in a JSON (JavaScript Object Notation) file, with the file name specified by the user. The obtained calibration coefficients can subsequently be applied to adjust the readings of the IR temperature sensor. For this purpose, a dedicated application has been developed (Fig. 6), which enables the selected calibration JSON file to be loaded, the calibration coefficients to be applied, and, upon entering a temperature measured by the thermometer, provides a calibrated and accurate temperature value of the measured object.

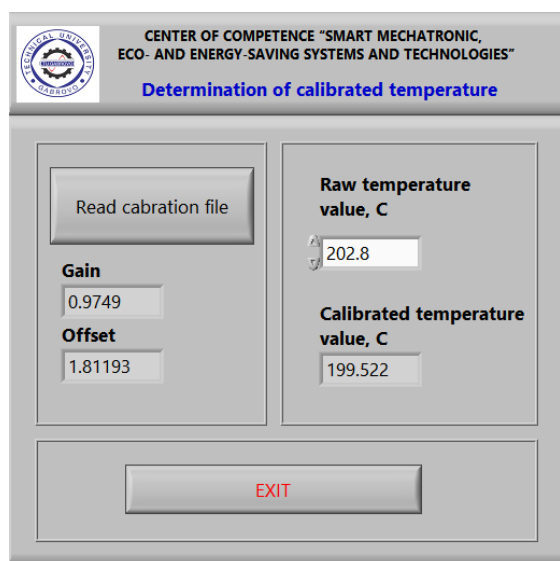


Figure.6 Application interface for loading calibration coefficients from a JSON file and obtaining calibrated IR temperature readings

To improve the accuracy of temperature measurements, several linear calibration functions can be established for distinct temperature ranges. The appropriate JSON file corresponding to the measured temperature range can then be applied,

ensuring more precise calibration of the IR thermometer.

6. CONCLUSION

This study presents a comprehensive methodology for the calibration of infrared thermometers using a specialized IR sensor calibrator (Fluke 4181) in combination with a custom-developed LabVIEW software application. The approach enables automated and precise comparison between the reference temperature set on the calibrator and the temperature measured by the infrared thermometer.

Through the developed application, linear calibration functions are generated by performing first-order polynomial fits to the measured data, resulting in the determination of Gain and Offset coefficients. These coefficients are stored in JSON (JavaScript Object Notation) files, which can be used to correct future measurements, ensuring accurate and reliable temperature readings from IR thermometers. For enhanced precision, multiple calibration functions can be established for different temperature ranges, allowing the application to select the appropriate function based on the measured temperature.

Experimental results demonstrate that the proposed method effectively minimizes measurement deviations, with post-calibration errors reduced to minimal values within the permissible limits. The integration of a dedicated calibrator and the flexible software application provides a user-friendly interface while maintaining high measurement accuracy, reproducibility, and reliability.

Overall, the developed calibration system offers a robust, flexible, and scalable solution for both laboratory and industrial environments. It enables precise non-contact temperature measurement, which is critical in fields such as medicine, industry, environmental monitoring, and research. By combining automated data acquisition,



regression-based calibration, and the ability to manage multiple temperature ranges, the methodology provides a practical framework for improving the performance of commercially available infrared thermometers and sensors.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was funded by the European Regional Development Fund within the OP “Research, Innovation and Digitalization Programme for Intelligent Transformation 2021-2027”, Project No. BG16RFPR002-1.014-0005 Center of competence “Smart Mechatronics, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies”.

REFERENCES

[1] Innovative Infrared Technology, Basic Principles of Non-Contact Temperature

Measurement, Optris GmbH.[Online]. Available: <https://www.optris.com>

[2] B. Earl, Calibrating Sensors, Adafruit Industries, Jun. 2024.[Online]. Available: <https://learn.adafruit.com/calibrating-sensors>

[3] S. Cui and J. Xing, “Research on Calibration Method of Infrared Temperature Measurement System Near Room Temperature Field,” *Frontiers in Physics*, vol. 9, Art. no. 786443, Jan. 2022, doi: 10.3389/fphy.2021.786443

[4] V. Barwick, Preparation of Calibration Curves: A Guide to Best Practice, LGC/VAM/2003/032, London, UK, 2003.

[5] Fluke Calibration, Infrared Thermometer Calibration – A Complete Guide, Application Note, Fluke Corporation, Everett, WA, USA, 2012. [Online]. Available: <https://www.flukecal.com>

[6] Fluke Calibration, Infrared Temperature Calibration 101.Using the right tool means better work and more productivity, Application Note, Fluke Corporation, Everett, WA, USA, 2012. [Online]. Available: <https://www.flukecal.com>.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

MULTICONNECTED MICELLAR PHASES FOR CLEANING APPLICATIONS

Tatiana Slavova¹, Krastanka Marinova^{1,2*}, Krassimir Danov^{1,2}

¹ Department of Chemical and Pharmaceutical Engineering, Faculty of Chemistry and Pharmacy,
Sofia University “St. Kliment Ohridski”, Sofia 1164, Bulgaria

² Centre of Competence “Smart Mechatronics, Eco- and Energy Saving Systems and
Technologies”, 1164 Sofia, Bulgaria

Corresponding author: km@lcpe.uni-sofia.bg

Abstract

The research paper explores the ability of isolated multiconnected micellar phases (MMP) to remove different soils (dimethicone, sebum oil, and makeup formulations) from artificial skin. The MMP is isolated from 3 wt% 1:1 sodium lauryl ether sulfate with 2 ethylene oxide group + cocamidopropyl betaine in the presence of 62 mM MgCl₂. The direct observations of soil removal demonstrate the efficacy of the MMP by two physicochemical mechanisms. For dimethicone soils, the roll-up mechanism is observed, i.e. shrinkages of the drop contact areas and decrease of the three-phase contact angles due to the changes in the interfacial tension and the surface energy. For sebum soils, the spontaneous emulsification mechanism takes place because of the mixing of the fatty acids present in the sebum with the surfactants and forming complex amphiphilic structures. For makeup formulations, the new approach based on the software image analysis by means of Image J is developed to account for the whole soiled area and to increase the precision of the quantitative cleaning characterization. The obtained results show that the bicontinuous phase successfully removes dimethicone, sebum oil, and foundation soils from the artificial skin and could have potential application in the design of new personal, home and industrial care products.

Keywords: artificial skin, multiconnected micellar phase, cleaning, contact angles, dimethicone and sebum removal, Vitroskin®

1. INTRODUCTION

The mixtures of sodium lauryl-ethersulfate (SLES) and cocamidopropyl betaine (CAPB) find broad applications in shampoos, body washes and other personal care products [1]. The physicochemical properties of mixed SLES+CAPB micellar solutions are widely studied in the literature [2–5]. The addition of indifferent electrolytes (salts) to single or mixed ionic surfactant solutions leads to an increase in the viscosity up to a maximum at a given salt concentration and to a subsequent viscosity decrease, that dependence is known in the literature as “the salt curve” [1,6,7]. The peak in the curve is explained with the transition from wormlike micelles to branched

micelles. With the rise of the salt concentration, the degree of crosslinking increases, until eventually the formation of a multiconnected micellar phase (MMP), see Refs. [5,8,9]. In the literature, the terms “multiconnected micellar phase”, “bicontinuous phase”, “saturated micellar phase”, “saturated network” and “sponge phase” are used as synonyms. The possibility to separate the bicontinuous phase from mixtures of anionic (SLES) and zwitterionic (CAPB) surfactant solutions in the presence of a small amount of divalent counterions (Ca²⁺, Mg²⁺, Zn²⁺) is described in the literature [8]. The separated phases engulf fragrances and spontaneously form nanoemulsions upon

dilution. Mixtures of CAPB and SLES are the main components in a wide range of personal care products. Nevertheless, to our knowledge, there are no investigations on the cleaning ability and potential applications of the SLES+CAPB containing sponge phases.

Recently [10,11], we developed an in vitro methodology for testing the cleaning efficacy of surfactants and their mixtures. The systematic characterization of the soil removal from artificial skin by applying direct optical observations demonstrated two basic cleaning mechanisms: emulsification and roll-up. In Ref. [12], gel-wipes has been invented and their cleaning efficacy has been directly determined using artificial skin (Vitroskin®).

In the present study, the cleaning properties of the multiconnected micellar phases using artificial skin (Vitroskin®) is investigated. For that purpose, we used a previously developed approach [10,11] and combined it with wiping off measurements adapted from Ref. [12].

2. MATERIALS AND METHODS

Materials

The studied anionic surfactant was sodium lauryl ether sulfate with 2 ethylene oxide group (SLES-2EO, Fig. 1A), product of BASF with a trade name of Texapon N70. The zwitterionic surfactant was cocamidopropyl betaine (CAPB, Fig. 1B), a product of Evonik, Essen, Germany, with a trade name Tego Betain F 50. To the mixed micellar solutions, we added inorganic salt $MgCl_2$, product of Chem-Lab.

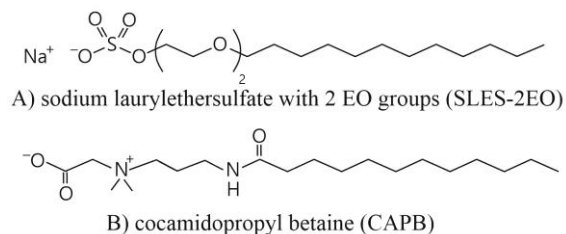


Fig. 1. Structural formulas of the used surfactants:
A) sodium lauryl ether sulfate with 2 ethylene oxide group (SLES-2EO); B) cocamidopropyl betaine (CAPB)

The multiconnected micellar phase was prepared as follows. First, the aqueous solution of the two surfactants (SLES and CAPB) was prepared. Next, the necessary amount of salt was added and the solution was stirred for one hour at 60 °C. After one night of equilibration of the solution, the formed multiconnected micellar phase was separated using separation funnel.

All solutions were prepared with deionized water generated by the Milli-Q purification system (Millipore, Burlington, MA, USA).

The used model soils were sebum and dimethicone (polydimethylsiloxane AK100, Wacker, Munich, Germany). The artificial sebum was prepared using the standard composition: 15% Squalene, 25% Wax esters, 2% Cholesteryl esters, 42% Triglycerides, 15% Fatty acids, 1% Cholesterol (all products of Sigma) [10,11].

For the wiping off experiments, we used two makeup formulations: Revlon® ColorStay Foundation in 520 Mocha and Liquid lipstick Essence Stay 8h Matte 08.

A synthetic skin substrate (Vitroskin®, N19-5X; IMS, Milford, CT, USA) was used for testing the efficacy of the cleaning formulations. The substrate effectively mimics the surface properties of human skin, it is designed to have similar topography, pH and ionic strength. It contains both optimized protein and lipid components [10-12].

Methods

Direct observations of the soil removal from Vitroskin®. Preliminary hydrated Vitroskin® substrate was placed at the bottom of a glass cuvette to be observed by the Drop Shape Analyzer DSA100E (Kruess GmbH, Hamburg, Germany) optical system. Then, a 5 μ L soil drop was deposited onto the substrate using a micropipette. After a rest for 5 min, 20 mL of the surfactant solution (thermostated at 30 °C) was gently added to the cuvette. The behavior of the soil drops in the solution was



monitored and recorded for 15 minutes using the optical system of DSA100E (Figs. 3A and 4). In the case of roll-up mechanism of drop detachments, the three phase contact angles were observed and their changes were recorded for subsequent data processing (Fig. 3B) [10,11].

Procedure for wiping off experiments. The cleaning protocol was adapted after [12]. The used procedure was as follows: after the hydration of the substrates for 16-20 hours, the stain (foundation or lipstick) was deposited. When using the foundation makeup, we apply 0.01g of the stain and spread it on the surface with a pipette. This amount from the foundation was enough to cover the whole test area. The liquid lipstick is applied on the test area using the lipstick's applicator, and the necessary quantity is 0.01g. After 2 hours of hydration of the skin with deposited stain, it follows the wiping off using cotton pads (for makeup removal). Every cotton pad was evenly coated with 1 mL isolated multiconnected micellar phase. Then, the test area was cleaned 10 times by hand with top-down direction. Note that, in order to avoid redeposition of the stain, we used different/new side of the cotton pad for every wipe off (see Fig. 5).

The standard approach to characterize the cleaning ability of products is to use the colorimetry to calculate the cleaning parameters [12]. Applying this method, the color parameters are averaged over a spot of only 8 mm diameter and the obtained results are quite scattered. To increase the precision and to account for the whole test region (25 mm diameter) of stained and cleaned skin, we developed an alternative approach. Using the software image analysis (by means of Image J), the respective images (Fig. 5) are transformed to gray scale and the intensity is averaged over the whole studied area. The grey color intensity of the hydrated skin before staining (I_{HS}) and the intensity of the hydrated cleansed

skin (I_{HCS}) are calculated. The quality of cleaning is characterized by the ratio of I_{HCS} and I_{HS} . Thus, the Cleaning(%) is determined by the following equation:

$$\text{Cleaning(\%)} = \frac{I_{HCS}}{I_{HS}} \times 100 \quad (1)$$

3. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

Formation of the multiconnected micellar phase

In the literature [5,8,9], the multiconnected micellar phase (MMP) was obtained using SLES-1EO and CAPB in the presence of $MgCl_2$. The interval of added salt, in which the sponge phase is formed, was from 40 to 80 mM $MgCl_2$, for 3 wt% 1:1 w/w SLES+CAPB [5].

Note that in our study, we used SLES-2EO, instead of SLES-1EO. That is why we prepared 1 wt% and 3wt% 1:1 SLES-2EO+CAPB solutions with different concentrations of added divalent salt (Fig. 2A). The sponge phase sediments at the bottom of the vial. To confirm the bicontinuous structure, we used the lipophilic dye BODIPY, which colors the separated phase in green (Fig. 2A).

The separated sponge phase was well seen in all solutions (Fig. 2) and its amount increased with the total surfactant concentration increase. That is why we separated a MMP from 3 wt% solutions in the presence of 62 mM $MgCl_2$ (see Fig. 2B). Then, we prepared a large amount of the solution and isolated the respective bicontinuous phase, which was used for all cleaning experiments. The total surfactant concentration in the separated multiconnected micellar phase from 3 wt% 1:1 SLES-2EO+CAPB + 62 mM $MgCl_2$ was obtained using the method from Refs. [8,9]. After drying out a probe to constant weight, the total surfactant concentration in the sponge phase was measured to be 6.75 wt%.

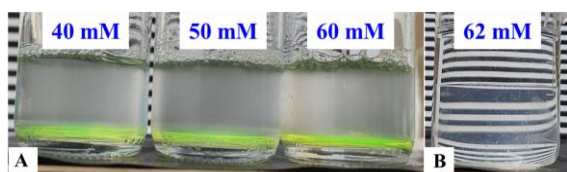


Fig. 2. A) Photographs of 1 wt% 1:1 SLES-2EO+CAPB + MgCl_2 in the presence of the lipophilic dye BODIPY. B) Photograph of 3 wt% 1:1 SLES-2EO+CAPB + MgCl_2 . The salt concentrations are denoted on the top

Direct observations of the soil removal from Vitroskin[®]

We performed the experiments at 30 °C with two different soils: dimethicone (Fig. 3) and model sebum (Fig. 4). Two mechanisms of the soil removal were clearly observed: emulsification of sebum and roll-up of dimethicone drops.

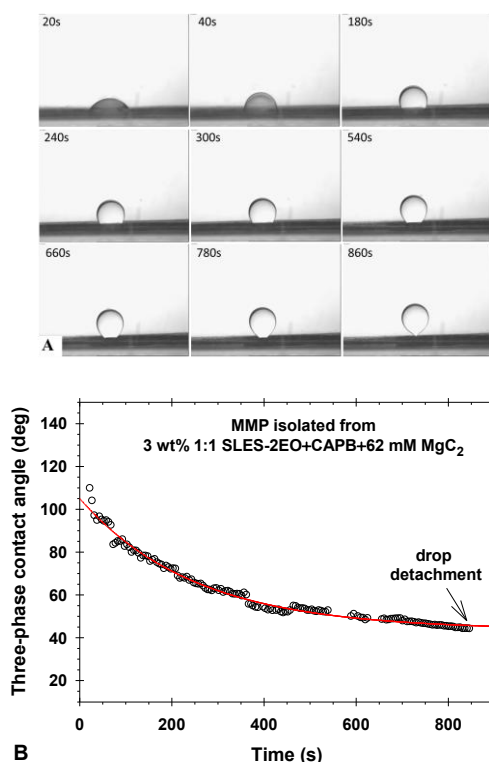


Fig. 3. A) Images of dimethicone soil at different times, as shown at each image, after immersion in multiconnected micellar phase. B) The decrease of the three-phase contact angle of the drop illustrated in Fig. 3A – the solid line is a guide to the eyes

Removal of the dimethicone drop attached to the skin. In this case, after pouring the surfactant solution (sponge phase) in the cuvette, the contact area between the dimethicone drop and the substrate decreases slowly (Fig. 3A) while the three-phase contact angle decreases considerably from 110° to 60° (Fig. 3B) for the first 300 seconds. In the next 560 seconds, the contact angle slowly decreases with only 20° while the drop base diameter shrinks orders of magnitude to the full drop detachment after 860 seconds. Analogous observations are reported in the literature [10] for mixed micellar solutions of conventional surfactants. The relatively slow detachment process (cf. 860 s with MMP vs 200-250 s in Ref. [10]) is due to the large viscosity of the multiconnected micellar phases [5]. The roll-up mechanism of soil removal is explained by the changes in the interfacial tension and the surface energy because of the surfactant adsorption, which leads to a simultaneous change in the three-phase contact angle and the drop/substrate contact area.

Removal of sebum from the skin. With artificial sebum, we observed emulsification of the soil (Fig. 4). Immediately after pouring the multiconnected micellar phase in the cuvette, small sebum droplets are simultaneously formed and detached from the skin without any additional agitation. With time, the sizes of detached droplets decrease and the removal process becomes more and more intensive.

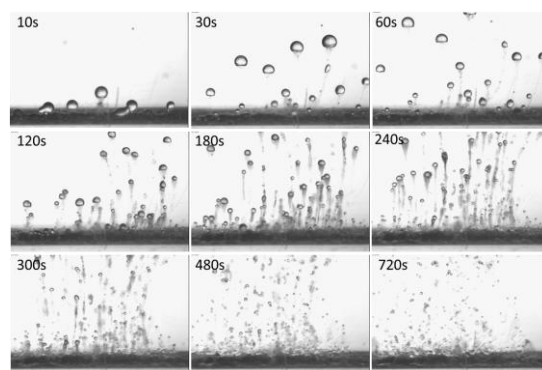


Fig. 4. Sebum droplets after the addition of multiconnected micellar phase at different times

In our previous study [11], this mechanism was only observed with the sebum oil and conventional micellar surfactant solutions, when the interfacial tension was extremely low [11]. The difference in the mechanisms is because of the composition of the two soils (dimethicone vs sebum). The fatty acids present in the sebum, mix with the surfactants, forming complex amphiphilic structures and effectively decrease the interfacial tension [11].

The direct observations of the soil removal from Vitroskin[®] showed that in both cases (sebum or dimethicone), the bicontinuous phase successfully removes the soil from the artificial skin and could have potential application in the design of personal care products.

Wiping off experiments on artificial skin using cotton pads

For these experiments, we used two makeup stains with considerably different chemical compositions (liquid lipstick and foundation). On hydrated skin we deposit the stains and wait for 2 hours of contact while hydrating. The wiping off of the stain was conducted 10 times by hand, using cotton pads (see Section 2). To characterize the bicontinuous phase efficacy, we performed test experiments with cotton pads coated with 1 mL deionized water. The calculated Cleaning(%) was $37.3 \pm 0.2\%$ for liquid lipstick and $79.9 \pm 0.8\%$ for foundation. When cleaning with bicontinuous phase, formed from 3 wt% 1:1 SLES-2EO+CAPB + 62 mM MgCl₂, the results were the following: $46.1 \pm 0.2\%$ for liquid lipstick; $93.7 \pm 0.5\%$ for foundation. The lipstick stain is more difficult to be cleaned, compared to the foundation stain due to the difference in their compositions.

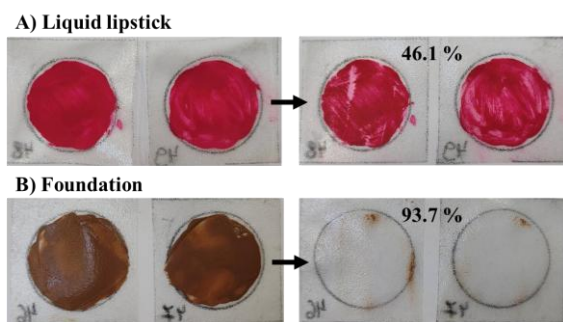


Fig. 5. Photographs before (left column) and after (right column) cleaning of: A) liquid lipstick; B) foundation. The calculated average Cleaning(%) is denoted on the images after cleaning.

4. CONCLUSIONS

The cleaning abilities of isolated multiconnected micellar phases in the case of dimethicone, sebum oil, and two makeup formulations deposited on artificial skin have been studied. The sponge phase with total surfactant concentration of 6.75 wt% is isolated from 3 wt% 1:1 SLES-2EO+CAPB + 62 mM MgCl₂. Our investigations clearly demonstrate the soil removal efficacy of bicontinuous phases using two different experimental protocols.

The direct observations of the soil removal from artificial skin prove two mechanisms: roll-up (detachment of dimethicone drops because of the shrinkage of the drop contact area with the skin and the decrease of the three-phase contact angle); and spontaneous emulsification (with sebum oil because of the mixing of the fatty acids present in the sebum with the surfactant solution). In both cases, the bicontinuous phase has good cleaning ability.

The in vitro methodology combined with wiping off measurements with makeup formulations (liquid lipstick and foundation) demonstrates the possibility of the sponge phases to remove foundation effectively. The developed new approach of calculating Cleaning(%), based on software image



analysis by means of Image J, gives quantitative information on the efficacy of the surfactant solutions accounting for the whole soil test regions.

The obtained results could be of practical interest for development of new formulations based on the bicontinuous phases for different soft and solid surface cleaning.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was funded by the European Regional Development Fund under the Operational Program “Scientific Research, Innovation and Digitization for Smart Transformation 2021-2027”, Project CoC “Smart Mechatronics, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies”, BG16RFPR002-1.014-0005.

REFERENCES

- [1] Nicolas-Morgantini L. Giant micelles and shampoos. Zana R., Kaler E.W. (Eds.), Giant Micelles. Properties and Applications, Taylor and Francis, New York, Ch. 17 (2007) 493–514
- [2] Tzocheva S.S., Kralchevsky P.A., Danov K.D., Georgieva G.S., Post A.J., Ananthapadmanabhan K.P. Solubility limits and phase diagrams for fatty acids in anionic (SLES) and zwitterionic (CAPB) micellar surfactant solutions. Journal of Colloid and Interface Science 369 (2012) 274-286
- [3] Tzocheva S.S., Danov K.D., Kralchevsky P.A., Georgieva G.S., Post A.J., Ananthapadmanabhan K.P. Solubility limits and phase diagrams for fatty alcohols in anionic (SLES) and zwitterionic (CAPB) micellar surfactant solutions. Journal of Colloid and Interface Science 449 (2015) 46-61
- [4] Mitrinova Z., Tcholakova S., Golemanov K., Denkov N., Vethamuthu M., Ananthapadmanabhan K.P. Surface and foam properties of SLES+CAPB+fatty acid mixtures: Effect of pH for C12–C16 acids. Colloids and Surfaces A 438 (2013) 186-198
- [5] Stancheva T.S., Georgiev M.T., Radulova G.M., Danov K.D., Marinova K.G. Rheology of saturated micellar networks: Wormlike micellar solutions vs. bicontinuous micellar phases. Colloids and Surfaces A 652 (2022) 129927
- [6] Parker A., Fieber W. Viscoelasticity of anionic wormlike micelles: Effects of ionic strength and small hydrophobic molecules. Soft Matter 9 (2013) 1203–1213
- [7] Yavrukova V.I., Radulova G.M., Danov K.D., Kralchevsky P.A., Xu H., Ung Y.W., Petkov J.T. Rheology of mixed solutions of sulfonated methyl esters and betaine in relation to the growth of giant micelles and shampoo applications. Advances in Colloid and Interface Science 275 (2020) 102062
- [8] Georgiev M.T., Aleksova L.A., Kralchevsky P.A., Danov K.D. Phase separation of saturated micellar network and its potential applications for nanoemulsification. Colloids and Surfaces A 607 (2020) 125487
- [9] Slavova T.G., Radulova G.M., Danov K.D. Saturated Micellar Networks: Phase Separation and Nanoemulsification Capacity. Colloids and Interfaces 8 (2024) 11
- [10] Slavova T., Stanimirova R., Marinova K., Danov K. Cleansing mechanisms and efficacy on artificial skin. Molecules 30 (2025) 1813
- [11] Marinova K., Slavova T., Stanimirova R., Danov K. Artificial skin characterization for cleansing observation and quantification. In Proceedings of the 33rd IFSCC Congress, Barcelona, Spain, 4–7 September 2023
- [12] DeMarco G.M., Ekman-Gunn E., Poccia J.F. III. Gel Wipe Composition Comprising a Superabsorbent Gel Fiber. U.S. Patent US20160367102A1, 22 December 2016.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ИНТЕНЗИФИКАЦИЯ НА ТОПЛООБМЕНА В КОНВЕКТИВНИ ТОПЛООБМЕННИ АПАРАТИ

HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN CONVECTIVE HEAT EXCHANGERS

Plamen Jordanov Bonev

Technical University of Gabrovo,
pbonev@tugab.bg

Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Valentin Metodiev Petkov

Technical University of Gabrovo,
petkov_v@tugab.bg

Abstract

The existing various techniques for enhancement of heat transfer can be applied in existing heat exchangers. The present study was conducted with the aim of improving the heat exchange of convective heat exchangers with natural convection. The tasks for achieving the goal are: application of passive techniques for enhancement of heat transfer in a smooth tube; experimental determination of the degree of increase in the thermal power Q and the heat transfer coefficient UA .

The experiments were conducted with an experimental sample - a single round tube of a certain length, ribbed with a certain pitch with lamellas. As an intensifier, a twisted tape insert with a certain pitch was used. The constraint for equal operating conditions is equal temperature difference between the average temperature of the water in the pipe and the ambient air. The determination of the investigated values was carried out according to standard methodology.

The results showed an increase in Q and UA in the range of $80 \div 95\%$ in the region $2600 \div 5000 Re$.

The originality of this research is that the results can be implemented in the production of such devices to increase their energy efficiency.

Keywords: heat transfer enhancement, thermal power, heat transfer coefficient, twisted tape insert.

ВЪВЕДЕНИЕ

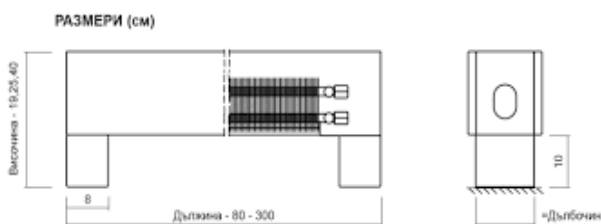
Постоянният стремеж към икономия на енергия и материали предизвикват непрекъснати усилия за разработването на по-ефективно топлообменно оборудване. Добре известно е, че това може да се постигне чрез интензификация на топлопреносните процеси, с което да се подобрят термичните характеристики на топлообменните апарати (ТА). Конвективните топлообменни апарати с флуид, движещ се в гладки тръби са масово срещани в практиката. Едни от тях се ползват за отоплителни, вентилационни и климатични системи, т.н. накратко „конвектори“. Целта им

е термична обработка на въздуха чрез т.н. процеси на „сухо нагряване“ или „сухо охлаждане“, като според режима на работа основно се делят на апарати с *естествена* или с *принудена* конвекция.

Съществуват различни техники и технологии за интензификация на топлообмена [1,2]. Тези технологии могат да бъдат приложени върху съществуващи топлообменни апарати. На основа на Първия закон на термодинамиката, Уеб и Бергълс [3,4] предложиха критерии за оценка на повишената ефективност на апарат с интензификация на топлообмена, спрямо стандартния такъв с гладки тръби.

Съществуват две направления в интензификацията на топлообмена. Първото е свързано с увеличаване на топлинния поток, независимо от допълнителните разходи на енергия, които са свързани с увеличената помпена мощност за пренасяне на топлоносителя. Второто направление е свързано с увеличаване на топлинния поток при неизменна мощност за преодоляване на хидравличните съпротивления, т.е. с увеличаване на ефективността на топлопредаване. Това е особено важно при стационарно работещи ТА с голяма мощност.

Настоящото изследване е проведено за постигане на резултати по Първото направление, чрез подобряване на топло-обмена над този, използван в стандартната практика на конвектори с естествена конвекция (Фиг. 1), чрез прилагане на пасивна техника за интензификация.



Фиг. 1. Конвектори с естествена конвекция

ЦЕЛ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

В един ТА, топлинният поток $\dot{Q}$, който се разменя между двата флуида, се определя от

$$\dot{Q} = \frac{UA}{L} \times L \Delta T_m, W \quad (1)$$

където: U е коефициент на топлопреминаване, W/m^2K ; A – топлообменна площ, m^2 ; L – дължина на тръбния сноп, m ; ΔT_m – средна температурна разлика между двата флуида, K .

В ур. (1), L/UA е общото термично съпротивление на единица тръбна дължина и се определя от

$$\frac{L}{UA} = \frac{L}{\zeta_i h_i A_i} + \frac{L t_w}{k_w A_m} + \frac{L}{\zeta_o h_o A_o}, mK/W, \quad (2)$$

където ζ е ефективност при оребрени повърхности.

За простота, в Ур. (2) не са включени съпротивленията от замърсявания, които понякога могат да играят много важна роля.

Характеристиката на всеки ТА се подобрява, ако UA/L се повиши. Техника за повишаване на топлообмена може да бъде използвана към всеки един от членовете hA/L поотделно или към двата едновременно. Това ще намали термичното съпротивление за единица дължина на тръбата, L/UA , което може да се използва за целта на изследването, а именно:

- Повишена топлинна мощност $\dot{Q}$, при постоянна тръбна дължина L , увеличавайки стойността на UA .

Основните задачи за постигане на целта са:

- Прилагане на пасивни техники за интензификация на топлообмена в кръгла гладка тръба (вътрешна интензификация) чрез вложка от усукана лента;

- Опитно определяне на степента на нарастване на топлинната мощност и коефициента на топлопреминаване.

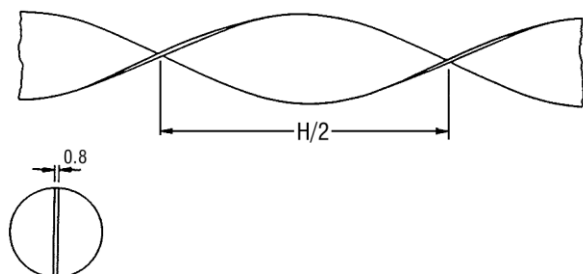
ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ



Фиг. 2. Опитен образец и вложка от усукана лента

Параметри на изследвания образец: гладка тръба с диаметри $D_o = 16.5 \text{ mm}$, $D_i = 15.7 \text{ mm}$, дължина $L = 1.0 \text{ m}$, ламели (ребра) $50 \times 50 \text{ mm}$, 183 бр.

Вложката от усукана лента е получена от медна ивица с дебелина 0.8 mm и стъпка $H = 210 \text{ mm}$ (Фиг. 3).



Фиг. 3. Параметри на усуканата лента

Режимни параметри: работен флуид – вода с входна температура $T_i = 50 \div 56 \text{ }^\circ\text{C}$, дебит $V_i = 0.2 \div 3.8 \text{ l/min}$, температура на околния въздух $T_a = 20 \div 26 \text{ }^\circ\text{C}$.

Реална оценка на ползите при използване на техники за интензификация на топлообмена може да се получи, ако експерименталните данни за гладката тръба и такава с интензификатори, са получени при еднакви режимни условия. Тъй като експе-

рименталните изследвания са проведени с опитен образец от серийно произвеждан топлообменник. Образецът представлява единична кръгла тръба с определена дължина, която е оребрена през определена стъпка с ламели (Фиг. 2).

риментът се провежда при естествена конвекция на единична тръба с околния въздух, ограничението в този случай е еднаква температурна разлика между средно-аритметичната обемна температура на водата в тръбата T_f и околния въздух - $\Delta T_m = 29 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задачата на експеримента е определяне на топлинната мощност $\dot{Q}$ и коефициентът на топлопреминаване UA при ламинарен и преходен режим.

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ИЗСЛЕДВАНИТЕ ВЕЛИЧИНИ

Критерий на Рейнолдс, Re

Стойността на критерия на Рейнолдс се определя от

$$Re = \frac{u_m D_i}{\nu} = \frac{4 \dot{V}}{\pi D_i \nu}, \quad (3)$$

където кинематичният вискозитет ν се определя по корелационни зависимости за водата, в зависимост от температурата ѝ.

Топлинна мощност $\dot{Q}$

Пренесената топлинна мощност между тръбата и околния въздух се определя от

$$\dot{Q} = \rho c_p \dot{V} (T_o - T_i), \text{ W} \quad (4)$$

$$\Delta T_m = T_f - T_a, \text{ K} \quad (5)$$

където T_i и T_o са средно-обемните температури на водата на входа и изхода на изследваната тръба.

Определянето на плътността $\rho(T_i)$ и специфичният топлинен капацитет $c_p(T_f)$, се извършва по корелационни зависимости, според входната и средно-аритметичната обемна температура на водата.

Движеща температурна разлика ΔT_m

Определя се между средно-аритметична обемна температура на водата в тръбата T_f и околния въздух T_a

Коефициент на топлопреминаване UA

Определя от Ур. 1:

$$UA = \dot{Q} / \Delta T_m, \text{ W/K} \quad (6)$$

Експериментите са извършени на опитна уредба (Фиг. 4), която е подробно описана в [5]. Използвани са възможностите на външния контур на уредбата, където входната температура на водата може да се задава с точност $\pm 0.1^\circ\text{C}$, а обемния дебит може да бъде измерван с точност $\pm 0.5\%$.

Таблица 2. Опитани резултати за тръба с лента

T_i °C	T_o °C	T_f °C	T_a °C	ΔT_m °C	V_i l/min	Q W	UA W/K	Re
55.3	47.5	51.4	24.7	26.7	0.20	107	4.00	265
56.1	53.4	54.8	25.5	29.3	0.61	113	3.86	809
56.1	54.4	55.3	25.8	29.5	1.00	117	3.97	1327
56.1	54.9	55.5	25.8	29.7	1.52	125	4.21	2017
56.1	55.1	55.6	25.8	29.8	2.00	138	4.63	2654
56.0	55.2	55.6	25.8	29.8	2.50	138	4.63	3317
55.9	55.3	55.6	26.0	29.6	3.02	132	4.46	4007
55.9	55.3	55.6	26.1	29.5	3.52	135	4.58	4671
55.9	55.4	55.7	26.1	29.6	4.03	139	4.69	5348



Фиг. 4. Опитна уредба с изследвания образец



ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

Резултатите от опитните изследвания са представени таблично в Табл. 1 и 2.

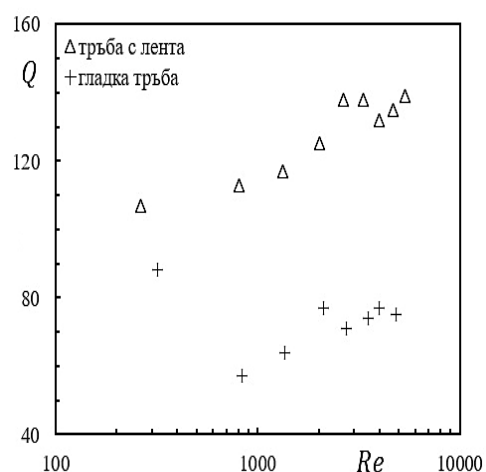
Таблица 1. Опитни резултати за гладка тръба

T_i °C	T_o °C	T_f °C	T_a °C	ΔT_m °C		V_i l/min	Q W	UA W/K	Re
50.0	44.7	47.4	20.1	27.3		0.24	88	3.22	318
50.5	49.2	49.9	20.5	29.4		0.63	57	1.93	836
50.5	49.6	50.1	20.6	29.5		1.03	64	2.18	1367
50.5	49.8	50.2	20.6	29.6		1.60	77	2.62	2123
50.4	49.9	50.2	20.7	29.5		2.06	71	2.42	2734
50.6	50.2	50.4	20.8	29.6		2.66	74	2.48	3530
50.5	50.1	50.3	20.9	29.4		3.00	77	2.62	3981
50.4	50.1	50.3	20.9	29.4		3.64	75	2.57	4830

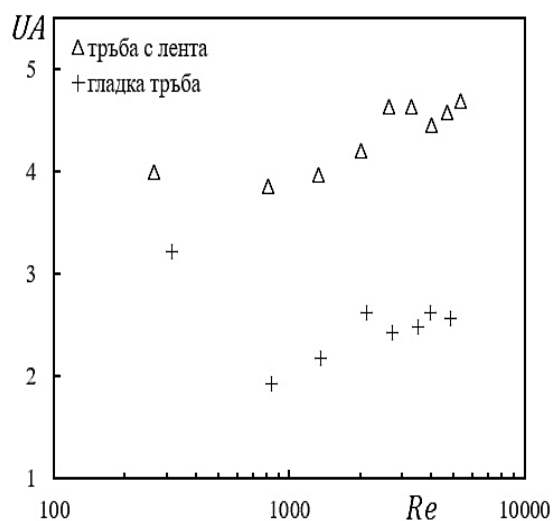
В резултат на тези данни са получени характеристики от вида: $\dot{Q} = f(Re)$ и $UA = f(Re)$, показани на Фиг. 5 и 6.

Няколко извода могат да се направят от така получените резултати:

1. За гладката тръба по-високи стойности за $\dot{Q}$ и UA са получени в края на ламинарната и цялата преходната област ($Re > 2000$), като не се забелязва тенденция за сериозно нарастване с увеличаване на Re .



Фиг. 5. Изменение на $\dot{Q}$ в зависимост от Re



Фиг. 6. Изменение на UA в зависимост от Re

2. За тръбата с лента стойностите за $\dot{Q}$ и UA се увеличават с нарастване на Re . Най-високите стойности са в преходната област ($Re > 2600$), като и тук тенденцията за нарастване с увеличаване на Re се изчерпва. Характера на стойностите в цялата област е различен от този на гладката тръба. Това може да се обясни с факта, че наличието на лента променя хидродинамиката на потока, което води до различни ефекти на топло и масопренос в тръбата [6].

3. Най-голямото увеличение спрямо гладката тръба е в ламинарната област (около 800 Re) между 60 ÷ 100%, докато в преходната зоната ($Re > 2600$) нарастването е между 80 ÷ 95%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От получените резултати и направени изводи е ясно, че прилагането на пасивни техники за интензификация на топло-обмена могат да доведат до значително повишаване на ефективността на конвективните топлообменни апарати.

Важният въпрос е: В коя област за характер на потока да работи апарата с цел постигане на максимални показатели? Както беше отбелязано в анализа на резултатите и за двата случая това е областта на преходно течение. Бяха направени и частични опити в турбулентната област (до 7350 Re), които показаха по-ниски резултати, поради което отпаднаха от обекта на изследване.

Бъдещите изследвания ще са насочени в три аспекта:

- определяне на най-добрата стъпка на усуканата лента;
- повишаване на външния коефициент на топлопредаване (външна интензификация), чрез определяне на оптималната стъпка и размери на осребряването.
- оценка чрез критерии, основаващи се на едновременното прилагане на Първия и Втория закон на термодинамиката и критерий за минимизиране на генерирания поток от ентропия, при ограничения, налагани от Втория закон на термодинамиката [7,8].

Приложната страна на това изследване е резултатите да бъдат внедрени в съществуващото производство на такива изделия.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

Докладът се публикува във връзка с резултатите от изпълнение на дейностите по проект № НИП2025-13 „Повишаване на ефективността на конвективни топлообменни апарати“.



ЛИТЕРАТУРА

- [1] R.L. Webb, Principles of Enhanced Heat Transfer. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- [2] R.L. Webb, Nae-Hyun Kim, Principles of Enhanced Heat Transfer. Taylor & Francis Group, LLC, 2005.
- [3] R.L. Webb, Performance evaluation criteria for use of enhanced heat transfer surfaces in heat exchanger design, Int. J. Heat Mass Transfer 1981; 24: 715-726.
- [4] R.L. Webb, A.E. Bergles, Performance evaluation criteria for selection of heat transfer surface geometries used in low Reynolds number heat exchangers, in Kakac, S., Shah, R.K., Bergles, A.E. (Eds) Low Reynolds Number Flow Heat Exchangers, Hemisphere Publ. Corp., Washington, D.C. 1983; 735-742.
- [5] Petkov VM, Possibilities of experimental set-up for investigation of heat transfer enhancement of single-phase flows in pipes and ducts. in: Proceedings of the international scientific conference “Unitech’ 13”, vol. III, 2013, p. 316-320.
- [6] Kalinin E.K, Drejcer G.A, Jarho S.A, Intenzifikacii Teploobmena v kanalah. Moskva: “Mashinostroenie”, 1990.
- [7] Bejan, A. Entropy Generation Through Heat and Fluid Flow. New York: John Wiley & Sons, 1982.
- [8] Bejan, A. Entropy Generation Minimization. CRC Press, Boca Raton, FL, 1996.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

СИСТЕМА ЗА МОНИТОРИНГ НА ФИНИ ПРАХОВИ ЧАСТИЦИ В УРБАНИСТИЧНА СРЕДА

A SENSOR NETWORK FOR URBAN PARTICULATE MATTER MONITORING

H. Zhivomirov

Technical University of Varna

I. Nedelchev

Technical University of Varna

Abstract

Air pollution caused by fine particulate matter (PM), particularly PM_{2.5}, poses a major environmental and public health risk. Conventional air quality monitoring stations, though accurate, are costly and sparsely distributed, which restricts their ability to capture local variations. This study presents the deployment of a low-cost sensor network in Varna, Bulgaria, using PurpleAir PA-Flex-II devices equipped with dual Plantower PMS6003 laser sensors and a Bosch BME688 sensor for environmental parameters. Five strategically chosen urban locations were selected to reflect different traffic and residential conditions. Since January 2024, the network has provided continuous two-minute interval measurements, stored locally and transmitted online for real-time access. Data undergo comprehensive preprocessing, including anomaly filtering, correction of missing values and consolidation into hourly and daily datasets. The system enhances the spatial and temporal resolution of particulate matter monitoring and supports the implementation of EU Directive 2024/2881 by identifying pollution hotspots.

Keywords: air quality, particulate matter, low-cost sensors, PurpleAir, urban monitoring.

ВЪВЕДЕНИЕ

Замърсяването на въздуха с фини прахови частици (PM), особено с диаметър под 2,5 μm (PM_{2.5} и PM_{1.0}), представлява сериозен екологичен и най-вече общественоздравен проблем. Тези частици могат да проникнат дълбоко в дихателните пътища, допринасяйки за възникване на респираторни и сърдечно-съдови заболявания, повишавайки равнищата на обща заболеваемост и смъртност [1, 2].

През 2024 г., с Директива 2024/2881 [3], ЕС извършва актуализация на съществуващото законодателство за качеството на въздуха. Новата директива въвежда значително по-строги пределни стойности за ключови замърсители, включително фини прахови

частици, и изисква засилено наблюдение, особено в чувствителни зони като училища, болници и индустриални райони. Директивата трябва да бъде транспонирана до декември 2026 г.

В тази светлина, разбирането на пространствената и времева динамика на фините частици е от решаващо значение за ефективното управление на качеството на въздуха и за оценката на здравните въздействия.

Традиционните системи за мониторинг на качеството на въздуха, включително автоматичните станции, осигуряват висока точност при измерване на концентрациите на прахови частици, но са скъпи, разположени оскъдно и концентрирани главно в



градските центрове [4]. Това не дава възможност за улавяне на локалните вариации на замърсяването, особено в големи градове, където взаимодействат няколко фактора на замърсяване – индустрия, строителство, транспорт и др.

С масовизацията, миниатюризацията и значителното поевтиняване на електронните устройства, през последните години нискобюджетните сензори за прахови частици се наложиха като ефективно допълнение към традиционните мрежи, предлагайки по-висока пространствена наситеност при значително по-ниска цена [4, 5].

Съчетанието на обективните потребности и новите технологични възможности доведе до иниципирането на проект за дългосрочен мониторинг на замърсеността на въздуха в град Варна, с основни цели:

1. Да се изследва концентрацията, пространствената и времевата динамика на фини прахови частици (с акцент върху PM_{2.5}) в град Варна, чрез изграждане на мрежа от нискобюджетни сензори;

2. Да се подпомогне изпълнението на изискванията на ЕС за качество на въздуха чрез локализация на източниците на замърсяване и набеязване мерки за тяхното потискане.

ИЗЛОЖЕНИЕ

1. Материална база

Съществуват няколко международни мрежи за мониторинг на качеството на въздуха с използване на нискобюджетни сензори – PurpleAir, Clarity, AirVisual, Sensor.Community [6, 7].

В рамките на проекта избора пада върху online-платформата и сензорните устройства на щатската компания PurpleAir Inc. Това е мотивирано от съчетанието на висока измервателна точност и надеждност, чрез двуканално измерване, както и от възможността за лесно включване в глобална мре-

жа от станции с отворен достъп до данните. PurpleAir предлага конкурентно решение спрямо други съвременни платформи, като Clarity, чиито уреди са с висока прецизност, но значително по-скъпи и обвързани с лицензионни споразумения, AirVisual, предназначена основно за индивидуално и вътрешно приложение, и Sensor.Community, базирана на самостоятелно сглобявани устройства с ниска точност и възпроизводимост на резултатите. PurpleAir постига добър баланс между достъпност, лесно внедряване и качество на измерванията, което го прави подходящо решение за научно-приложни цели, вкл. в рамките на т.нар. гражданска наука [4, 8, 9].

PurpleAir PA-Flex-II е най-новото поколение нискобюджетно, високо-ефективно сензорно устройство за мониторинг на аерозолни частици в атмосферния въздух. То е оборудвано с два независими лазерни сензора за фини прахови частици (PM_{1.0}, PM_{2.5} и PM₁₀) PMS6003 (Plantower / Nanchang Panteng Technology Co., Ltd., China), което позволява вътрешна валидация на измерванията и от там, повишена надеждност на данните.

Допълнително, устройството е снабдено и със сензор BME688 (Bosch Sensortec GmbH, Germany), за измерване на температура и влажност на въздуха и атмосферно налягане. Данните се събират и записват в поставена в устройството microSD карта, а освен това се предават в реално време чрез Wi-Fi свързаност към онлайн платформа, която позволява визуализация върху глобална карта и осигурява достъп до исторически и текущи стойности за целите на научния анализ, моделиране и обществен мониторинг. Компактният и устойчив на атмосферни условия дизайн (фиг. 1) прави PA-Flex-II особено подходящ за дългосрочни теренни изследвания в урбанизирани среди [5].

Plantower PMS6003 е цифров сензор за измерване концентрацията на прахови частици, използващ принципа на лазерното разсейване, при който светлината, разсейвана от частиците, се улавя и, чрез микропроцесорна обработка използвайки зависимостите описващи т.нар. разсейване на Ми, за да се изчислят размерите и броя на частиците в различни размерни диапазони. Сензорът може да детектира частици с минимален размер около $0,3 \mu\text{m}$. Обхватът му за $\text{PM}_{2.5}$ е $0 \div 500 \mu\text{g}/\text{m}^3$, а максималният измерим обем достига $\geq 1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Резолуцията е $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Времето за единична реакция е под $\sim 1 \text{ s}$, а общото време на реакция е $\leq 10 \text{ s}$. Точността е $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ за концентрации между $0 \div 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, и $\pm 10\%$ за $100 \div 500 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Стандартният обем на пробата е около $0,1 \text{ l}$ въздух [10].



Фиг. 1. Външен вид на PurpleAir PA-FLEX-II.
Забелязват се двата сензора PMS6003.

2. Локация

Варна е третият по големина град в България – голям икономически, образователен и културен център, разположен във Варненски залив на Черноморското крайбрежие, с население от приблизително 330 хил. души (данни на НСИ за 2020 г.).

Като „морска столица“ на страната, Варна съчетава пристанищни дейности, промишлено производство, натоварени транспортни артерии и специфични крайбрежни метеорологични условия – фактори, които оказват силно влияние върху локалното качество на въздуха.

Сензори са разположени в пет нарочно подбрани локации (фиг. 2, табл. 1). Целта е да се обхване пространствената хетерогенност на замърсяването и да се проследят сезонните и дневните вариации.

3. Данни

Мониторингът обхваща продължителен период на непрекъснат отчет, с официално начало 01.01.2024 г., което позволява при анализа да се открият: сезонни вариации (зима/лято, отоплителен сезон, морски туристически сезон); седмични и дневни вариации (работни дни/уикенди, пикови часове на трафика).

Данните от измерванията се записват в microSD-картата на устройството (с капацитет 32 GB, достатъчен за над четири години непрекъсната работа), като отделни .csv-файлове, всеки обхващащ период от едно денонощие. Интервалът на запис е две минути. Структурата на данните в .csv-файла е показана на [11].

Записаните данни се извличат от microSD-картата в началото на всяка следващата календарна година, след което се преминава към тяхната първична обработка, т.нар. Data Tidying и Data Cleaning. Тя се извършва в софтуерната среда на Matlab® и включва: премахване на излишни променливи (измерени параметри, които нямат отношение към изследването), реаранжиране позицията на променливите и тяхното преименуване (с цел по-лесен и интуитивен достъп), рескалиране на някои променливи (времева щампа и температура), претърсване за аномални стойности (моментни ситуационни пикове) и тяхната обработка (изглаждане) чрез Hampel филтър, премахване на записи с липсваща времева щампа (като напълно откъснати от времевата серия) и поправка на записи, на които липсват стойности на някои от променливите (чрез попълване с най-близката съседна валидна стойност).



Фиг. 2. Карта на разположението на сензорите в гр. Варна.

Табл. 1. Географска локация и описание на позициите на сензорите в гр. Варна

Локация	Географски координати	Тип зона	Кратко описание
1	43°12'39.0" N 27°55'08.6" E	Централна градска част (идеален център)	Непосредствено до основен булевард с интензивен трафик; представител на транспортно натоварена зона.
2	43°13'07.6" N 27°56'01.4" E	Жилищен квартал	Непосредствено до крупно сложно кръстовище на два основни булеварда с интензивен трафик; представител на транспортно натоварена зона.
3	43°13'29.2" N 27°54'45.5" E	Жилищен квартал	Разположен в типична жилищна среда с умерено транспортно натоварване.
4	43°13'05.1" N 27°54'03.1" E	Централна градска част (широк център)	Непосредствено до основен булевард с интензивен трафик; представител на транспортно натоварена зона.
5	43°13'57.3" N 27°53'07.2" E	Жилищен квартал	Разположен в типична жилищна среда с ниско транспортно натоварване.

Допълнително се сравняват паралелните измервания на двата независими лазерно-оптични канала (А и В), като записите с ниска взаимна корелация се елиминират като ненадеждни. Така обработените сурови данни са допълнително обобщени на часова и дневна база и консолидирани в нова база от данни в .csv и .mat формат, като се

предвижда популяризация им чрез репозиториума Mendeley Data. За да се интерпретират по-добре получените резултати, се предвижда използването на допълнителни данни, събрани от самите сензори, от професионална метеорологична станция Davis Wireless Vantage Pro2™ Plus (Davis Instruments Corp., USA), закупена по проекта,



както и от платформата Open-Meteo, която предоставя достъп до климатичния набор ERA5, разработен от ECMWF, включващи температура, относителна влажност, атмосферно налягане, валежи, скорост и посока на вятъра и мн. др. Тези фактори са от значение в крайбрежен град като Варна, където специфичния местен климат (атмосферна циркулация) влияе силно върху концентрациите на прахови частици.

4. Анализ

Следващата стъпка, върху която работи екипът, е анализът на данните, което включва: темпорален анализ – изчисляване на дневни, седмични и сезонни вариации (вкл. анализ на т.нар. „уикенд ефект“) и пространствен анализ – сравнение на концентрациите между различните локации и тяхната корелация. Отделно ще се направи оценка и в регулаторен контекст спрямо пределните норми, определени в Директива 2024/2881.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведеното изследване демонстрира възможностите на нискобюджетните сензори от ново поколение за дългосрочен мониторинг на фините прахови частици в урбанизирана среда. Чрез изграждането на сензорна мрежа в гр. Варна, базирана на PurpleAir PA-Flex-II устройства, бе осигурена значително по-голяма пространствена плътност на измерванията в сравнение с традиционните автоматични станции. Това дава възможност за по-добро разбиране на локалната хетерогенност на замърсяването и за проследяване на неговата времева динамика – от дневни и седмични вариации до сезонни зависимости.

Получените данни подлежат на внимателна предварителна обработка, включваща филтриране на аномални стойности, корекция на липсващи записи и елиминиране на несъгласувани измервания между двата не-

зависими канала. Това позволява формирането на надеждна база данни, подходяща за последващ статистически анализ, моделиране и регулаторна оценка. В допълнение, комбинирането на резултатите от сензорната мрежа с метеорологична информация дава възможност да се открият факторите, влияещи върху концентрациите на ФПЧ, като атмосферна циркулация, транспортна активност и отоплителни процеси.

Изследването има не само научен, но и приложен характер. То съдейства за изпълнение на изискванията на Директива 2024/2881 на ЕС, като подпомага идентифицирането на проблемни зони и предлага основа за разработване на политики и мерки за ограничаване на замърсяването. В този смисъл проектът има важно значение за подобряване на качеството на живот в урбанизираните райони, като предоставя ценна информация за местните власти, научната общност и гражданите.

Източник на финансиране: Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. Schwartz, D. W. Dockery, and L. M. Neas, "Is daily mortality associated specifically with fine particles?," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, vol. 46, no. 10, pp. 927–939, Oct. 1996.
- [2] A. J. Cohen, M. Brauer, R. Burnett, H. R. Anderson, J. Frostad, K. Estep, *et al.*, "Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: An analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015," *Lancet*, vol. 389, no. 10082, pp. 1907–1918, May 2017.



- [3] European Union, "Directive (EU) 2024/2881 of the European Parliament and of the Council of 13 March 2024 on ambient air quality and cleaner air for Europe and repealing Directives 2004/107/EC and 2008/50/EC," *Off. J. Eur. Union*, Mar. 2024. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/2881/oj/eng>
- [4] K. Ardon-Dryer, Y. Dryer, J. N. Williams, and N. Moghimi, "Measurements of PM_{2.5} with PurpleAir under atmospheric conditions," *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 13, no. 10, pp. 5441–5458, Oct. 2020, doi: 10.5194/amt-13-5441-2020.
- [5] L. Wallace, "Intercomparison of PurpleAir sensor performance over three years indoors and outdoors at a home: Bias, precision, and limit of detection using an improved algorithm for calculating PM_{2.5}," *Sensors*, vol. 22, no. 7, p. 2755, Apr. 2022, doi: 10.3390/s22072755.
- [6] P. Kumar, L. Morawska, C. Martani, G. Biskos, M. Neophytou, S. Di Sabatino, *et al.*, "The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities," *Environ. Int.*, vol. 75, pp. 199–205, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.envint.2014.11.019.
- [7] N. Castell, F. R. Dauge, P. Schneider, M. Vogt, U. Lerner, B. Fishbain, *et al.*, "Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates?," *Environ. Int.*, vol. 99, pp. 293–302, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.envint.2016.12.007.
- [8] T. Sayahi, A. Butterfield, and K. E. Kelly, "Long-term field evaluation of the PurpleAir PM sensor in an urban environment," *Atmos. Environ.*, vol. 219, p. 117043, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117043.
- [9] K. K. Barkjohn, B. Gantt, and A. L. Clements, "Development and application of a United States-wide correction for PM_{2.5} data collected with the PurpleAir sensor," *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 14, no. 7, pp. 4617–4637, Jul. 2021, doi: 10.5194/amt-14-4617-2021.
- [10] Plantower, *PMS6003 Series Data Manual*. Plantower, 2016. [Online]. Available: https://www.laskakit.cz/user/related_files/203-pms6003.pdf
- [11] PurpleAir Community, "SD card file headers," 2024. [Online]. Available: <https://community.purpleair.com/t/sd-card-file-headers/279>



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ИЗГРАЖДАНЕ И ВЪВЕЖДАНЕ В ЕКСПЛОАТАЦИЯ НА ХИДРОАКУСТИЧЕН ИЗМЕРВАТЕЛЕН БУЙ В АКВАТОРИЯТА НА ВАРНЕНСКИ ЗАЛИВ

CONSTRUCTION AND COMMISSIONING OF A HYDROACOUSTIC MEASURING BUOY IN THE AQUATORY OF VARNA BAY

I. Nedelchev

Technical University of Varna

H. Zhivomirov

Technical University of Varna

Abstract

Underwater sounds and noises have always been part of human activity, mainly as a product of industrial and transport structures. However, the imported anthropogenic noise is in conflict with the natural sounds generated mainly by marine mammals, through which their communication is carried out and is part of their vital activity. It is widely known that some species of marine mammals develop characteristic traits in their communication depending on the characteristics of the environment and the group in which they live. Since the Black Sea region is characterized by some features that are not found in other sea basins (closedness, salinity, distribution of life in shallow areas), this also suggests features in the communication of the three species of dolphins inhabiting the region - bottlenose dolphin, bottlenose dolphin, Black Sea common dolphin. In this study, a hydroacoustic buoy was used to reveal some of the peculiarities of marine mammal communication, as well as the impact of anthropogenic noise pollution from human activity on their way of life.

Keywords: hydroacoustic measurements; hydroacoustic buoy; marine mammals.

ВЪВЕДЕНИЕ

Въпросът за шумовите замърсявания и наличието на шумов фон с необичайно високо ниво в широк спектър в акваториите по цял свят, придобива все по-тревожен и актуален характер. Наличието на остри, широкоспектрни шумове и звуци от антропогенни източници, особено в промишлени и пристанищни райони, оказват съществено влияние не само върху бозайниците, обитаващи крайбрежните райони на океаните и моретата, но също така дават отражение и върху човешката популация, обитаваща в непосредствена близост до пристанищните райони на големите промишлени комплекси. Механизмът на влия-

ние е известен: звуковите вълни се разпространяват над четири пъти по-бързо във водна среда и чрез засилен интензитет могат да окажат въздействие (в определени моменти и с летален изход) върху биосонари и резонансни органи на морските бозайници, нарушавайки техния начин на живот, адаптивни възможности и дори дългосрочното им поведение. Вече две десетилетия, директивите на ЕС [1, 2, 3, 4] за качеството на морските води определят шумът като един от важните дескриптори и качествени критерии за състоянието на морската среда в рамките на съюза. Изучаването на тези взаимодействия и влияния има особена актуалност със завишаването на екологичните

изисквания за морските райони, особено в регион като черноморския, характеризиращ се освен със споменатите по-горе особености, но и с наличието на извънредна динамика в човешката дейност от различен характер в последните няколко години.

ИЗЛОЖЕНИЕ

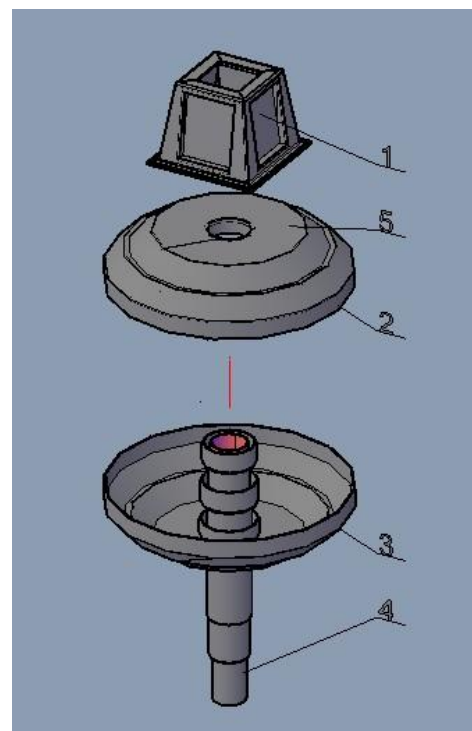
Един от най-широко разпространените методи за измерване и установяване на вида и нивото на подводния шум е чрез използването на хидрофони, разположени на различни платформи: буйове, плавателни средства или конструкции, понтони, мостове, плаващи съоръжения в близост до изследваните обекти и т.н. Един от най-гъвкавите и точни начини за измерване на подводни звуци и шумове е използването на средства с добра плаваемост, устойчивост и ниско ниво на собствен шум и с възможност за монтаж на хидроакустични сензори за запис, съхранение и предаване на информацията. Екипът на лаборатория „Изследване на подводни шумове, сигнали и вибрации на морски съдове и съоръжения“ се ориентира към използването на широко разпространена конструкция за изработката на морски буй, като тази конструкция се модифицира за нуждите на дългосрочно измерване, при което бяха поставени следните изисквания:

- удобен и сигурен монтаж на хидроакустичен логер, като основен измервателен сензор с възможност за лесно обслужване в реални условия;
- възможност за енергийна автономност – монтаж на акумулатор във вътрешното пространство на буя и/или соларни панели на надводната част;
- възможност за информационна автономност – локално съхранение на данните от измерванията за дълъг период от време – около един сезон;
- ниско ниво на собствен шум – проектиране на котвена система без вери-

га и с минимално количество метални крепежни елементи

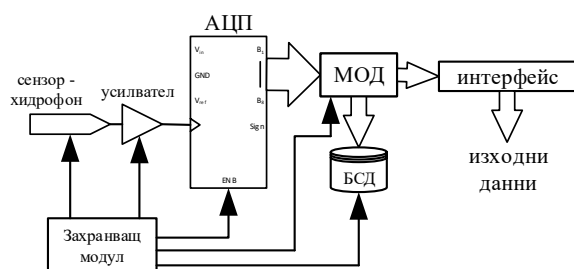
- надеждно закотвяне и устойчивост на вълнение, характерно за Черно море – до 6 бала;
- възможност за последващи модификации на съоръжението с цел монтаж на допълнителни сензори и разширяване на измерваните параметри на морската среда.

На фиг. 1 е показана базовата конструкция на хидроакустичния буй. В измервателния ръкав се помещава хидроакустичният сензор с възможност за автономност, както по отношение на енергията, така и с възможност за съхранение на големи обеми от данни. По подразбиране наличният софтуер ги компресира в съотношение 1:3, което допълнително разширява времето за запис и измерване в реални условия.



Фиг. 1. Базова конструкция на хидроакустичен буй (1 – надстройка; 2 – водолиния; 3 – корпус подводна част; 4 – измервателен ръкав; 5 – корпус надводна част).

Измервателният логер представлява основен елемент в цялата конструкция. Изграден е от: високочувствителен хидрофон, усилвател, модул за обработка на данни (МОД), блок за съхранение на данните (БСД), захранващ блок, интерфейс (фиг. 2).



Фиг. 2. Основни модули на хидроакустичния логер.

Захранващият модул представлява блок от батерии с висок капацитет.

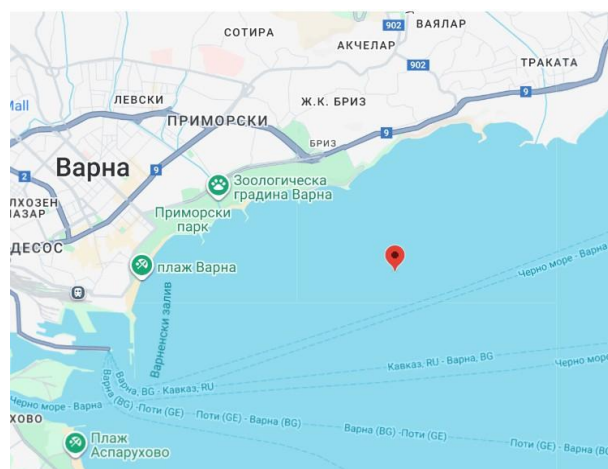
Това дава енергийна автономност на съоръжението до 4 месеца работа без обслужване. Блокът за съхранение на данните позволява запис на данни до 2 ТВ върху карти-памет чрез четири адресируеми слота, които могат да се управляват софтуерно. Информационната автономност също е от порядъка на 4 месеца при непрекъснат запис с най-високата честота на дискретизация. Ето и някои от параметри на хидроакустичния логер, които представляват неговите основни предимства като измервателен уред [5]:

- максимален коефициент на усилване – 173 dB към ниво 1 μ Pa;
- максимална честота на дискретизация – 384 KHz;
- разрядност на АЦП – 16 bit;
- възможност за програмиране на периодичен запис.

Съгласно теоремата на Найкуист:

$$f_s \geq 2f_{max}, \quad (1)$$

където f_s е честотата на дискретизация, а f_{max} е максимална честота в спектъра на изследвания сигнал, с честота на дискретизация от $f_s = 384$ kHz, измервателният уред позволява запис на сигнали до 192 kHz. Тази честотна лента е напълно достатъчна за запис на сигнали от морски бозайници, чиято максимална честота на генерираните сигнали при различните видове делфини достига до 180 kHz.



Фиг. 3. Месторазположение на хидроакустичния буй във Варненския залив.

След проектирането и изграждането на конструкцията и котвената система, буйът беше разположен на подходящо място с координати (43°12'02.0"N 27°57'57.0"E) в акваторията на Варненския залив (фиг. 3), където освен че се наблюдава интензивен трафик на морски плавателни средства, но и се очакваше засилено присъствие на морски бозайници (делфини) поради наличието на миграционни пътища от морето към Варненското езеро и обратно.

Поради широкия честотен спектър на очакваните сигнали генерирани от делфини, хидроакустичният логер беше настроен за запис с максимална ширина на пропусканата честотна лента т.е. от 10 Hz до 192 kHz. Измервателната сесия бе с продължителност от три месеца. Записани бяха зву-

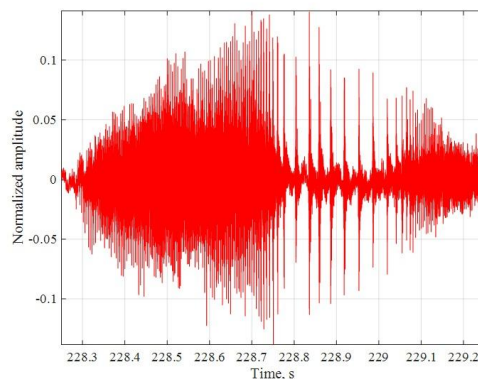
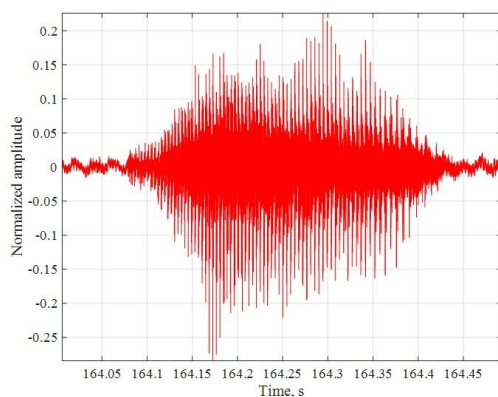
кови последователности, както от преминаващи кораби и по-малки транспортни средства, но също така и от различни видове делфини, което потвърди предположенията за интензитета на тяхното присъствие в района.

Получените данни впоследствие бяха обработени и беше създадена база от данни, публикувана в издание с отворен достъп [6]. След анализ и обработка на някои от получените данни, резултатите са докладвани в национални конференции [7] и реферирани издания с по-висок ранг [8].

Някои от получените резултати породиха интерес сред учени-лингвисти в чужбина, изучаващи комуникацията между морските бозайници. С тях бяха анализирани характеристиките на получените сигнали, като начини за комуникация между морските бозайници от гледна точка на лингвистичните похвати на изразяване на информацията.

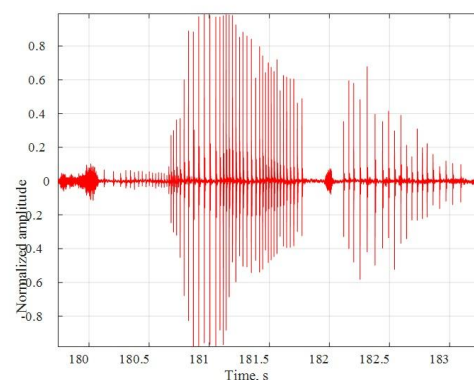
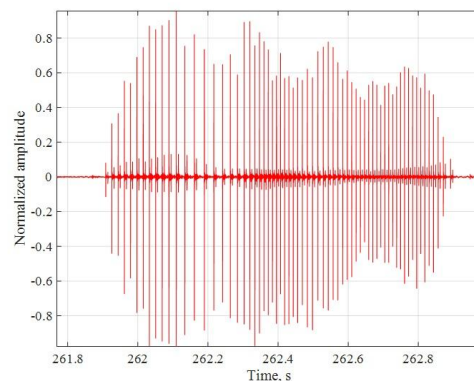
Установени бяха някои зависимости и характерни особености на получените сигнали от делфини. Те могат да бъдат разделени на две основни групи, като първата представляват шумоподобни сигнали със сравнително кратка продължителност (фиг. 4).

Шумоподобните сигнали са сравнително рядко използвани и разпростиращи се в широка честотна лента. Често те предхождат другия основен тип сигнали - импулсните.



Фиг. 4. Шумоподобни кратки сигнали.

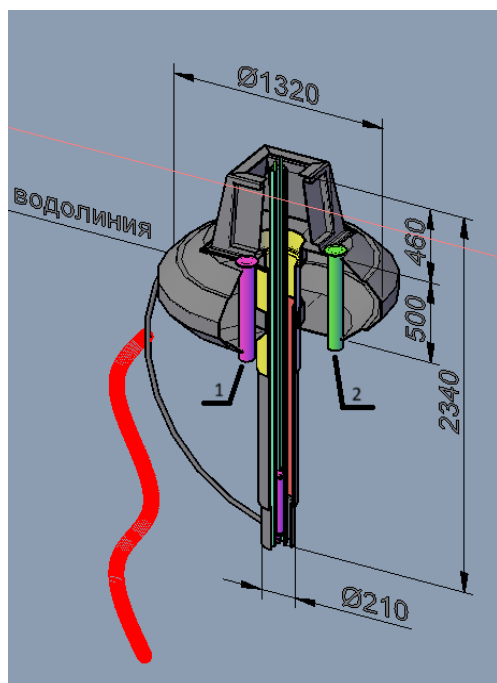
Втората група са добре структурирани импулсни сигнали с по-голяма продължителност (фиг. 5).



Фиг. 5. Импулсен тип сигнали.

Този тип сигнали са с по-голяма продължителност. Те са структурирани като поредица от стръмни и кратки импулси и тях делфините използват предимно за ехолокация и разпознаване на обекти. Те зна-

чително разширяват използвания честотен спектър. Трябва да се отбележи, че от първата година на създаването си, лаборатория „Изследване на подводни шумове, сигнали и вибрации на морски съдове и съоръжения“ сключи меморандум за сътрудничество с „Феста Делфинариум“ Варна, в рамките на който бяха извършени измервания на сигнали от карибски делфини от рода афала, с които разполага делфинариумът. Измерванията бяха направени чрез хидроакустичния канал за изследвания, с който разполага лабораторията. Получените резултати бяха сравнени със сигналите на дива делфини, записани по-късно в акваторията на Варненския залив чрез хидроакустичния буй. Анализът показва сходство на двата вида сигнали от различните ареали на обитаване на делфините с малки разлики, които предстои да бъдат по-задълбочено анализирани. Допълнително беше установено, че изкуствено отглежданите делфини проявяват по-ограничено разнообразие в спектралните характеристики на сигналите си.



Фиг. 6. Допълнителни измервателни канали (1, 2) монтирани след реконструкция на буйа.

След известно време, на хидроакустичният буй беше направена планова профилактика, като бе използван моментът, за да се направят и някои подобрения с цел да се разширят неговите възможности по отношение на измервателните величини. Екипът на лабораторията от дълги години си сътрудничи с колеги от Студентски морски клуб към ТУ-Варна и след съвместно решение, буйа бе реконструиран така, че в него да бъдат поместени още два измервателни модула (фиг. 6).

Бяха монтирани следните допълнителни модули:

- модул телеметрия със сензор за измерване на киселинност на водата – изпращане на данните през GSM мрежа към уебсайт [9];
- модул за соленост, плътност и температура на морската вода [10].

Към момента хидроакустичният буй не е пуснат на вода за нови измервания и по него се извършват довършителни дейности от профилактиката и реконструкцията му. Планирана е смяна на позицията му в локация, която е от съществено значение, тъй като и в новата локация подводният звуков фон е също толкова разнообразен и интензивен. Очакват се нови и по-разнообразни данни, включващи резултати за параметрите от новите сензори, за които ще бъде създадена друга база от данни, характеризиращи новата точка на измерване. Същевременно ще бъдат подновени и измерванията на хидроакустичния фон в мястото на новата локация.

В по-дългосрочен план се очаква обработка на получените вече резултати от по отношение на някои специфични техни параметри (напр. различните видове модулация на използваните от делфините сигнали), като възможности за предаване на информация и за получаване на информация от подводните обекти т.е. ехолокация.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Направените изследвания са от съществено значение за разкриване на звуковия фон в бреговата акватория на българското Черноморие. Те дават представа за интензитета и разнообразието на съществуващите начини за подводна комуникация между трите основни вида делфини по морската брегова ивица. Изграденият хидроакустичен буй представлява гъвкава възможност за измерване на редица параметри на морската среда в различни позиции в близост до крайбрежни райони. Мобилността на хидроакустичният логер разширява тези възможности поради факта, че може да бъде използван автономно като звукова сонда за локално снемане на звуков фон в определени трудно достъпни места и от сушата.

Реализацията на описаните измервания е част от проект: BG05M2OP001-1.002-0023-C01 „Център за компетентност “интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии”, финансиран чрез Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Наука и образование за интелигентен растеж 2014 - 2020“

Екипът изразява благодарности на ръководството на проект:

BG05M2OP001-1.002-0023-C01 за цялостната организация и реализация в периода 2019-2024 г., както и на „Феста Делфинариум“ Варна за оказаното съдействие при изследванията.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] European Parliament and Council, *Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive)*, 2008.
- [2] European Commission, *Commission Decision of 1 September 2010 on criteria and methodological standards on good environmental status of marine waters*, C(2010)5956, 2010.
- [3] European Commission, *Commission Decision (EU) 2017/848 of 17 May 2017 laying down criteria and methodological standards on good environmental status of marine waters and specifications and standardised methods for monitoring and assessment, and repealing Decision 2010/477/EU*, 2017.
- [4] Ministry of Environment and Water of the Republic of Bulgaria, *Marine Strategy of the Republic of Bulgaria 2022–2027*. [Online]. Available: <https://www.moew.government.bg/bg/vodi/morski-vodi/morska-strategiya-na-republika-bulgariya/morska-strategiya-na-republika-bulgariya-2022-2027-g/>. [Accessed: 12-Sep-2025].
- [5] Ocean Instruments, *Products and Solutions*. [Online]. Available: <https://www.oceaninstruments.co.nz/>. [Accessed: 12-Sep-2025].
- [6] I. Nedelchev and H. Zhivomirov, *Dolphins Underwater Sounds Database*. IEEE Dataport, 2023. [Online]. Available: <https://iee-dataport.org/open-access/dolphins-underwater-sounds-database>. [Accessed: 12-Sep-2025].
- [7] H. Zhivomirov, I. Nedelchev, H. Pirovsky, G. Dimitrov, “Exploration of Hydroacoustic Dolphin Signals”, *Proceedings of International Scientific Conference „Mechatronic, Eco- And Energy Saving Systems And Technologies“* 22 May 2023, Gabrovo, pp. 42-48, 2023.
- [8] I. Nedelchev, H. Zhivomirov, *et al.*, “Analysis of Dolphin Underwater Acoustic Signals Recorded in the Black Sea,” *Applied Sciences*, vol. 18, no. 7, p. 392, 2023. doi: 10.3390/a18070392.
- [9] Aquatic Sensors, *Power and Telemetry Module (PTM)*. [Online]. Available: <https://www.aquaticsensors.com/product/power-and-telemetry-module-ptm/>. [Accessed: 12-Sep-2025].
- [10] Aquatic Sensors, *Weather Station Module*. [Online]. Available: <https://www.aquaticsensors.com/product/weather-station/>. [Accessed: 12-Sep-2025].



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

АНАЛИЗ НА АСЕМБЛИРАЩАТА СИСТЕМА FAS 200 В ЛАБОРАТОРИЯТА ПО ИНТЕЛИГЕНТНО ПРОИЗВОДСТВО

ANALYSIS OF THE ASSEMBLY SYSTEM FAS 200 AT LABORATORY OF INTELLIGENT AUTOMATED MANUFACTURING

Albena Taneva

*Control Systems Department
Technical University of Sofia,
Plovdiv Branch*

Michail Petrov

*Control Systems Department
Technical University of Sofia,
Plovdiv Branch*

Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract

The flexible manufacturing is characterized by the individualization of products, easy reconfiguration, supporting modularity of the equipment and high quality. Usually such system consists of automated flexible assembly modules with different stages for instance: assembly, handling, quality inspection, transfer, warehouse and etc. In this way it offers ability to adapt the production according to the individual, assembly process and including different technologies from Industry 4.0. The aim of this article is to present the description, operation and analysis of modular system.

Keywords: flexible manufacturing systems, flexible assembly systems, intelligent manufacturing systems.

INTRODUCTION

Today's the manufacturing systems have to realize stable processes while manufacturing's environment is affected by high degree of complexity and autonomy, short delivery times and high product variety. Increasing labor productivity is a major factor in improving the economic indicators, financial condition and efficiency of production and business activities of the company. One of its components is the optimal use of machines and equipment in the production process. The use of production capacity, as well as the use of tangible fixed assets is characterized mainly by three indicators [1]:

- Coefficient for extensive use or use of production capacity over time. It represents the ratio of the actual working time fund to

the effective working time fund;

- Coefficient for intensive use of production capacity. It characterizes the use of production capacity per unit of time and is defined as the ratio of the actual work performed per unit of time worked to the design technical standard;

- Indicators for integrated use. They are defined as the product of the extensive use factor and the intensive use factor. They most fully characterize the use of production facilities.

Another point of view is focused on the early detection, diagnosis of faults, forecast of equipment damage, loss of performance and profits and even more. Nowadays, due to the evolution of the information and communications technologies, the flexible or even smart technique



has promised to explore self-optimizing manufacturing in industry by its potential such as maintaining process stability. The main part of Smart Manufacturing is flexible assembly systems (FAS) [2]. The FAS is a fully integrated production system consisting of computer numerically controlled assembly stations, connected by an automated material handling system, all under the control of a central computer [3], [4]. It is capable of simultaneously assemble a variety of product types in small to medium-sized batches and at high rate comparable to that of conventional transfer lines designed for high volume/low variety manufacture [5]. The fully automated manufacturing environment has been the ultimate goal of industrial companies that for a few decades already [6]. The idea was first put forward with the rise of the Computer Integrated Manufacturing (CIM) [7] in the early 1980s. Nowadays sophisticated communication technologies, big data analytics, Industry 4.0 technologies, integrated electronic components and modules, enable automation possibilities and the realization of new business models [8]. However, only a small number of companies still aims for a completely deserted and fully automated. Today, the workers and employees are seen as flexible and agile factory assets who should be supported in the best way possible. With the combination of human flexibility and experience on the one hand and the potential of process and factory automation on the other hand, major breakthroughs in the manufacturing environment are achievable. An effective human-machine collaboration enables companies to establish a production line or factory site suited for complex and/or highly integrated products that will continue to be profitable in future. Even though today's machines run automated processes, these are typically based on linear control systems. The concept of the automated factory transfers the already successfully applied use cases of automated basic processing steps at the single machine level (e.g. assembly of particular

components) to an in-house and even to a global industry level. Automated factories conduct major steps from material preparation via production to testing in an automated manner. The demand-driven self-operation of production allows parallel instead of linear production workflows within one factory and along the entire supply chain, e.g. products are being tested virtually while materials are being prepared for its production. Only the automated factory with an optimal supported flexible workforce can lead the industry to an efficient mass-customization of goods. To achieve these goals, flexibility of manufacturing is pivotal. The paper presents basic hardware components, characteristics of assembly system and analysis of its operation.

ASSEMBLY SYSTEM FAS 200

This is a flexible assembly system FAS-200, installed at laboratory of Intelligent Automation Manufacturing Systems in the Centre of Competence “Smart Mechatronic, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies“. The setup has different stations, each performing a part of assembly process. The flexible assembly system has been specially conceived for persons to acquire professional capabilities in connection with the Occupational Groupings of Electricity/Electronics and Maintenance, such as: - Installation, Electromechanical Maintenance and Line Transport; - Industrial Equipment Maintenance; - Automatic Control and Regulation Systems. It enables the development of various skills associated with pneumatic, electropneumatic, electrical, robotic and handling automatics, programming technologies, industrial communications, supervision, quality control, fault diagnosis and repair. Moreover, allows the study of a wide range of sensor types: - magnetic, inductive, capacitive, photoelectric detectors; optical fiber sensors; pressure and vacuum switches; linear encoders. The system

includes a flexible automation cell, which carries out an assembly process involving a number of predetermined parts with different possibilities. The items are transported consequently to the connected modules by an automated linear transfer line with corresponding stoppers and precision lifters-positioners. Parts are mounted on pallets. The process modules function either independently of the transport system, in single or couple modes, or integrated into it, in cell mode. The stations are located in a side of the linear transfer, and may be withdrawn for re-positioning in a different order. Each station has its own electrical panel, where the wiring system and Programmable Logic Controllers (PLC) are accessible. The users may design and build their own projects with different PLCs and subsequently integrate them in the station. The system is modular and may be extended, which allowed a future incorporation of other process modules according to the production mode. This enable all types of extension and modification. The assembling is performed as follows:

Phase A: Feed body or base to which the other parts are assembled and verification of its orientation.

Phase B: Pick and place bearing and measurement of its height.

Phase C: Pick and place cover and verification of its orientation, material and color.

Phase D: Quality control by vision

Phase E: Unloading and storage of final assembly. The parts of assemble process are presented on the fig. 1.



Fig. 1. Parts of the assembling process.

All five modules in installed assembling system are shown on fig. 2.



Fig. 2. Modular assembly system.

Transfer-vision inspection module FAS 215

The transport system, fig.3 is composed by long lines including five modules to facilitate the envisaged assembly process.



Fig. 3. Linear transfer module.

The modular transfer incorporates a pallet assembly to transport parts and assemblies across the handling stations. The pallets and the transfer stoppers integrate a binary coding system using inductive detectors, which allow the control system to identify the position of each pallet at any time.

Vision system:

The vision system fig. 4 consists in a vision sensor with integrated camera and controller. It can be used to easily achieve simple inspections and measurements.



Fig. 4. Vision system.

Feeding and transferring module FAS 203

This feeding module supplies the bearing which is going to be placed inside the housing formed in the body by the next module.



Fig. 5. Manipulators of the feeding module.

Also, this module transfers, fig.5 the bearing to the measurement position located on the next module, where the height is measured to differentiate between the two sizes of bearing.

Measuring - transferring module FAS 204

The measuring stage is complementary to the previous one. It is measured in this module the height to differentiate between the two sizes of bearings, fig. 6. This one rejects the bearing or places it inside the housing of the body on the pallet, depending of the signal “tall bearing” or “short bearing”.



Fig. 6. Measuring manipulator

Classification module FAS 209

The fourth of the components to be assembled in the system FAS 200 is a cover, which is fitted into a housing formed on the body for this purpose, fig. 7.



Fig. 7. Manipulators of the cover classification module.

The cover serves to retain the turning mechanism shaft mounted at the previous modules. This classification station feeds the cover, which is the closure cap for the turning mechanism, and verifies its material, color and height. Then, the next module rejects the cover or places it inside the housing of the body on the pallet, depending of the signals “metal cover”, “plastic cover”, “black cover”, “white cover”, “tall cover” and “short cover”.

Rejecting - transferring module FAS 210

This module, fig. 8 is complementary to previous one. This one rejects the cover or places it inside the housing of the body on the pallet, depending of the signal about the cover material from the PLC of the previous module.



Fig. 8. Cover rejecting and transferring module.

Warehouse module FAS 216

This storage module, fig. 9 uses a system based on two coordinate axes, so that the bodies (with bearings, shafts, covers and screws) picked off the conveyor belt may be allocated at any point on the surface of the module.



Fig. 9. Manipulators of the warehouse module.

SYSTEM ANALYSIS

During operation with the flexible assembling system they are used functional PLCs software programs, implemented like structural function codes. It is used KEServer for devices communication and SCADA system, fig.10. All stations are presented as clients, denoted as FAS 203, FAS 204, FAS 209, FAS 210, FAS 216. The figure presents the device parameters for the first station with PLC S7-1200. The IP address are defined and are used in the developed program for system functionality.

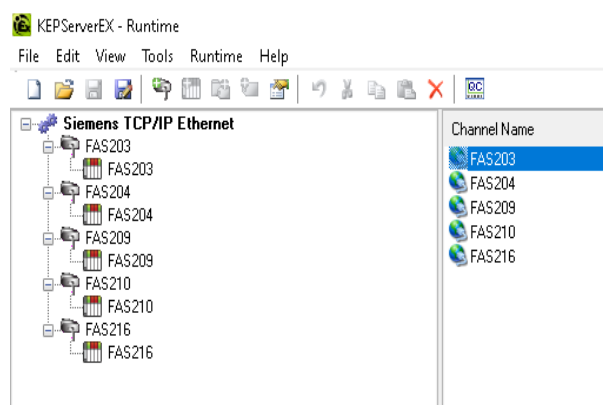


Fig. 10. Setting the modules as clients in KEServer



Fig. 11. SCADA main screen

On the fig. 11 is presented the main screen of the SCADA project, used for monitoring, gathering the data, control actions and optimization management.

The prepared SCADA project is made with Omron software CX-Supervisor. The main screen gives the possible options for operating and starting the system. There are individual SCADA pages for: *monitoring and control* of the first module. *feeding stage*, *quality inspection*, *sorting and rejection* steps. Respect to the user definition and selected options this project operates.

The results obtained during operation of FAS 200 show a correct function of the system and software implementation. The SCADA operational system is used for this purpose.

CONCLUSIONS

The aim of the work was to present an analysis and description of a flexible production system with great potential and reconfiguration of production modules for the needs of a new product. The FAS 200 system is the ideal answer to research and training in industrial automation. It is fully modular and flexible equipment and in keeping with industrial reality. The technologies included in its different assembly modules, as well as the assembly process with several variants, allow the user to develop the professional

skills required by modern automated industry.

ACKNOWLEDGMENT

This research was funded by the European Regional Development Fund within the OP “Research, Innovation and Digitalization Programme for Intelligent Transformation 2021-2027”, Project CoC “Smart Mechatronics, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies”, No. BG16RFPR002-1.014-0005.

REFERENCES

- [1] Anghinolfi D., Boccalatte A., Grosso A., Paolucci M., Passadore A., Vecchiola C. (2007) A swarm intelligence method applied to manufacturing scheduling, Proceedings of WOA, 65-70
- [2] H. Elmaraghy, “Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms”, International Journal of Flexible Manufacturing Systems, Vol. 17, No. 4, pp. 261-276, 2005.
- [3] SMC Networks. FAS-200 User Manual. 2020, p. 97.
- [4] SMC International Training. <https://www.smctraining.com/>
- [5] N. Asadi, “Flexibility in Assembly Systems using Product Design,” Ph.D. dissertation, Mälardalen University Press Dissertations., Printed by E-Print AB, Stockholm, Sweden, 2017.
- [6] A. Ahmadi, C. Cherifi, V. Cheutet, Y. Ouzrout. “Recent Advancements in Smart Manufacturing Technology for Modern Industrial Revolution: A Survey”. Journal of Engineering and Information Science Studies, 2020. p. 21, hal-03054284.
- [7] M.P. Groover, “Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing”, Harlow, Pearson Education, 2014.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

НОВИ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИЕТО НА ЛАБОРАТОРИЯТА ПО ИНТЕЛИГЕНТНИ ПРОИЗВОДСТВЕНИ СИСТЕМИ

NEW TRENDS OF DEVELOPMENT IN THE LABORATORY ON INTELLIGENT MANUFACTURING SYSTEMS

Albena Taneva

*Control Systems Department
Technical University of Sofia,
Plovdiv Branch*

Michail Petrov

*Control Systems Department
Technical University of Sofia,
Plovdiv Branch*

Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract

The idea of this paper is to describe the new trends of development of a manufacturing system in the laboratory of intelligent automated manufacturing systems. To present the trends of the manufacturing systems suitable for mass production processes. The laboratory set up has five units with a conveyor between each one. This equipment offers flexible training according to the industrial reality, simulating a real assembly process and including different technologies from Industry 4.0. The assembly system consists of an automated cells with five separate stages and a conveyor: assembly, handling, quality inspection, transfer and warehouse. It is the fruitful option to research and training in automation area. The main advantage is that it has fully modularity in keeping with industrial reality. The technologies included in its different assembly modules, as well as the assembly process with several variants, allow the user to develop the innovative ideas required by advanced automation. In this work the conventional control approach is presented with programmable logic controllers and supervisory control level. Additionally a fuzzy logic approach can be apply for pneumatic elements diagnostics and programmed in the controller software environment. This is can be viewed as a custom approach for control solution and a part of intelligent systems. Hence, the aim of this article is to present the new trends in development in the laboratory on intelligent automated manufacturing systems.

Keywords: flexible manufacturing systems, flexible assembly systems, intelligent manufacturing systems.

INTRODUCTION

The manufacturing is considered as a new paradigm that make work smarter and more connected, bringing speed and flexibility through the introduction of digital innovation [1]. Today, digital innovation is linked to the innovable of companies. Digitalization is a inseparable principle which is based on the concept of circular economy. It enables an economy model promoting the use of solutions like platforms, smart devices, artificial intelligence that help to optimize

resources.

The main part of Smart Manufacturing is Flexible Assembly Systems (FAS) [4]. This is a fully integrated production system consisting of computer numerically controlled assembly stations, connected by an automated material handling system, all under the control of a central computer. It is capable of simultaneously compound a variety of product items in small to medium-sized portions and at high rate comparable to that of conventional transfer lines. [3].



The aim of this article is to present basic hardware components of an assembly system and discuss its characteristics and describe some real applications [6], [8].

The automated manufacturing environment has been the ultimate goal of industrial companies that for a few decades already [4]. Years ago the idea was to put forward with the rise of the Computer Integrated Manufacturing (CIM) [7] in the early 1980s. Nowadays communication technologies, big data analytics, Industry 4.0 technologies, complex solutions integrate electronic components and modules, enable automation possibilities of new business models [6]. However, one may say a small number of companies still aims for a completely deserted and fully automated manufacturing. Only the automated factory with an optimal supported flexible workforce can lead the industry to an efficient mass-customization of goods. To achieve these goals, FAS is pivotal as shown in the next section. An effective human machine collaboration enables companies to establish a production line or factory site suited for complex and/or highly integrated products that will continue to be profitable in future. Even though today's machines run automated processes, these are typically based on linear control systems. Automated factories conduct major steps from material preparation via production to testing in an automated manner. The demand, driven self-operation of production, allows parallel instead of linear production workflows within one factory and along the entire supply chain, e.g. products are being tested virtually while materials are being prepared for its production. The goal of the article is to present the trends of the manufacturing systems suitable for mass production processes. For example, programmable algorithms for quality control data collecting, life time cycled of the equipment, predictive maintenance, and diagnostics, etc. The

pneumatic system repeats the identical programmed sequence during its operation. The data was collected when the pneumatic system worked perfectly and had some generated faults including empty magazine, zero vacuum, inappropriate material, no pressure, closed manual pressure valve, missing drilling stroke, poorly located material, not vacuuming the material and low air pressure. The faults are simulated according to developed algorithms in this investigation. The fuzzy logic is used to develop a new diagnosis algorithm for our case study. The analysis of the obtained results can be applied in the similar pneumatic systems in industry.

SYSTEM DESCRIPTION

This is a flexible assembly system, installed at laboratory of Intelligent Automation Manufacturing Systems in the new Centre of Competence “Smart Mechatronic, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies “. It is described a training equipment in mechatronics connected with Industry 4.0 technologies.



Fig. 1. Overall view of the equipment.

The FAS 200 [5] is comprised of different stations, each performing a part of assembly process. The flexible assembly system has been specially conceived for persons to acquire professional capabilities in connection

with the Occupational Groupings of Electricity/ Electronics and Maintenance, such as: Installation, Electromechanical Maintenance and Line Transport; Industrial Equipment Maintenance; Automatic Control and Regulation Systems. It enables the development of various skills associated with pneumatic, electropneumatic, electrical, robotic, programming and PLC technologies, industrial communications, supervision, quality control and fault diagnosis and repair. It also allows the study of a wide range of sensor types: - magnetic detectors; inductive detectors; optical fiber sensors; photoelectric detectors; capacitive detectors; pressure and vacuum switches; linear encoders. The system includes a flexible automation cell which carries out an assembly process involving a number of predetermined parts with different possibilities. The parts are transported consequently to the connected modules with corresponding stoppers and precision lifters-positioners. Parts are mounted on pallets. The process modules function either independently of the transport system, in single or couple modes, or integrated into it, in cell mode. Each station has its own electrical panel, where the wiring system are fully visible, while new elements may be fitted to the panel if it is necessary. The users may design and build their own projects and subsequently integrate them in the station. Can be develop a further series of skills envisaged in the training cycles for those persons who form the target group for the cell. The front of each station incorporates the start, stop, step-by step/continuous cycle and reset pushbuttons. In addition, the control pushbuttons incorporate a main switch on/off and emergency pushbuttons for emergency stops. The system is modular and may be extended, which allowed a future incorporation of other process modules according to the user needs. In addition to transport processes between cells a linear

conveyor is added, shown on Fig. 2 and is composed by long line, connecting the five modules to facilitate the envisaged assembly process. The available units are presented below as follows:

FAS 203: Station for feeding and transferring;
FAS 204: Measuring station;
FAS 209: Classification station;
FAS 210: Rejecting and transferring station;
FAS 215: Inspection and rejection station;
FAS 216: Storage station.

All stations are equipped with Simatic S7 1200 programmable logic controllers from Siemens company, TIA Portal programming software from Siemens; configuration, control, simulation and monitoring software with an operator station and SCADA software using the CX-Supervisor products from Omron company and developing software AutoSim from SMC company.

The parts of assembling process are presented on the Fig. 2.



Fig. 2. Parts of the assembling process.

NEW TRENDS OF DEVELOPMENT

According to the scientific program the main goals and tasks of the laboratory are generally related to:

- Predictive maintenance: intelligent devices and systems for collecting and sending data to cloud centers for the purpose of predictive maintenance.



- Remote management: remote support and management of automation devices;
- Production quality: improving the quality of production through statistical analysis and tools;
- Design and research of industrial networks for communication with SCADA and HMI elements;
- Fuzzy predictive control in industrial automation systems;
- Implementation of predictive control algorithms in controllers - using the IEC 61131.3 programming standard;
- Design, research and software implementation of algorithms for model predictive control and production optimization;
- Detection and diagnosis of errors in industrial automation systems;
- Predictive maintenance in industrial automation systems;
- Analysis and assessment of production quality;
- Statistical methods for analysis and management of production quality;
- Testing, calibration and adjustment of technical means for automation;

The services provided are in accordance with the thematic area 5.2. Mechatronics and Microelectronics of the Innovation Strategy for Smart Specialization 2021-2027.

It is planned to create new automation tools and control and management algorithms in the following subject areas:

Distributed Control Systems; Smart Manufacturing Execution System (SMES); Intelligent Manufacturing Systems; Modeling and Optimization of Manufacturing Processes; Predictive Control of Manufacturing Processes; Industrial Automation Elements - Industrial Sensors and Control Elements; Programmable

Logic Controllers; Human Machine Interface, SCADA systems for operational management and data collection; Manufacturing Quality Control systems.

DIGITAL TWIN IMPLEMENTATION

Here is described an example of digital twin implementation in assembly system FAS 200 as a possible new trend of development. For the purposes of digital twin implementation, it is used AutoSim software. Using AutoSim-200, it is able to monitor and control 3D processes. The physical inputs and outputs can be supervised and controlled. The data acquisition card can be applied. In this environment it can be import models from 3D Studio and Solidworks. In such configuration the OPC server and I/O cards have to be used to establish the real and physical communication with equipment.

Using different software like AutoSim and TIAPortal, the digital replica was developed for the body supply of the flexible integrated assembly stations FAS 200. The AutoSim implemented 3D model of the station FAS 09 is shown on Fig.3 and the AutoSim implemented 3D model of the station FAS 210 is shown on Fig. 4.

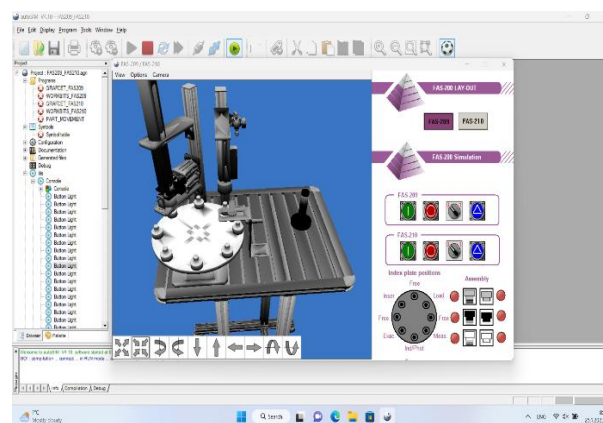


Fig.3. AutoSim implemented 3D model of the station FAS-209.

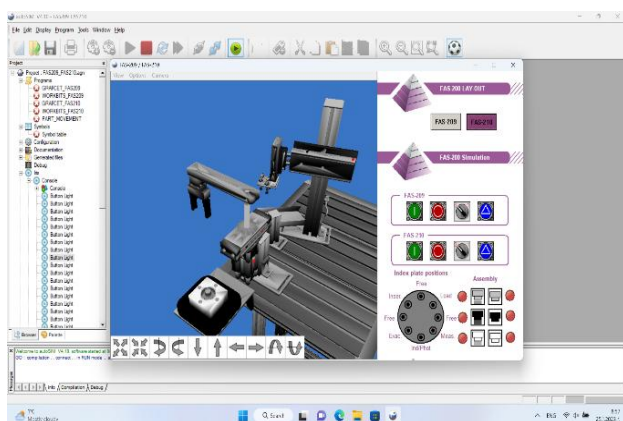


Fig.4. AutoSim implemented 3D model of the station FAS-210.

During operation with the flexible assembling stations for digital twin implementation, they are used functional PLC's software programs realized like structural function codes. It is used KEP Server for devices communication, AutoSim modelling software and SCADA system. Both mentioned modules of the equipment are presented and set as clients: FAS 209 and FAS 210.

QUALITY INSPECTION SYSTEM

Here in the inspection and rejection station it is performed quality control of the assembled part using an artificial vision system Fig.5. From the inspection position a visual system examines the assembled components with OMRON camera FQ2 [16].

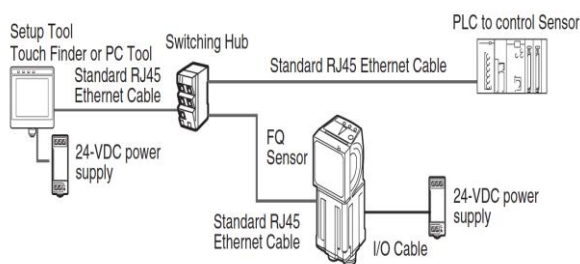


Fig. 5. Machine vision quality inspection system with camera FQ2.

The vision system consists of a vision sensor with an integrated camera and a PLC controller. It can be positioned to easily achieve the necessary inspections and measurements.

After calculations and continuous tests, the generated data are used and analyzed by Minitab software platform [14]. Fig. 6 shows Xbar-R control charts for white low caps generated in specialized environment.

Here, the result of quality inspection is evident and satisfactory. The sample data points of the condition indicator are between UCL (Upper Control Limit) and LCL (Lower Control Limit) limits. The graphics show that the represented data are in the predefined ranges. The inspection for one type cap is passed successfully.

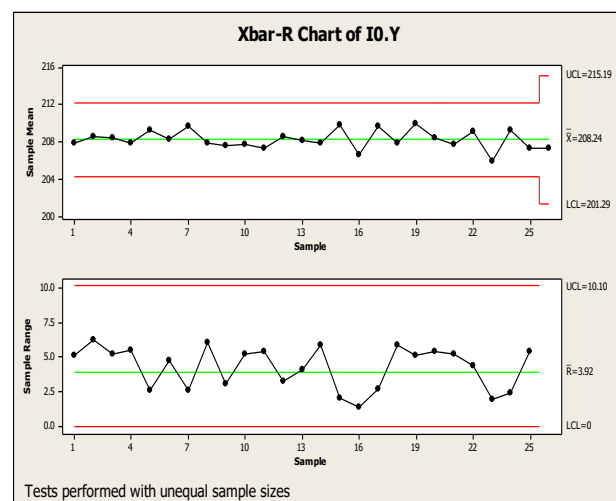


Fig 6. Control chart Xbar-R for white low caps.

FAULT DETECTION AND DIAGNOSIS

The aim of this trend is to monitor basic hardware components of a FAS and investigate possible faults, classify the errors and implement real diagnosis. The mentioned system offers professional training according to the industrial reality, simulating a real assembly process and including different technologies from Industry 4.0. This



equipment consists of an automated flexible assembly cell with five different phases: assembly, handling, quality inspection, transfer and warehouse. The pneumatic system repeats the identical programmed sequence during its operation. The data was collected when the pneumatic system worked perfectly and had some generated faults including empty magazine, zero vacuum, inappropriate material, no pressure, closed manual pressure valve, missing drilling stroke, poorly located material, not vacuuming the material and low air pressure. The faults are simulated according to developed algorithms in this investigation. The case study with fuzzy logic is used to develop a new sequence for FAS 204 module diagnosis. A program with idea for diagnostic has been developed in software environment for the PLC. The test experiment was conducted. By activating light signaling when one error occurs, for the selected measuring module, the response was properly. The analysis of the simulated faults is promising. The obtained results can be applied in the similar pneumatic systems in industry. The proposed solution is inspired by the need of the companies where the pneumatic actuators are widely used.

CONCLUSION

The new trends of development of a manufacturing system in the laboratory of intelligent automated manufacturing systems are described. The laboratory set up has five units with a conveyor between each one. This equipment offers flexible training according to the industrial reality, simulating a real assembly process and including different technologies from Industry 4.0. The assembly system consists of an automated cell with five separate stages and a conveyor: assembly, handling, quality inspection, transfer and

warehouse. It is the fruitful option to research and training in automation area. The main advantage is that it has full modularity in keeping with industrial reality. The technologies included in its different assembly modules, as well as the assembly process with several variants, allow the user to develop the innovative ideas required by advanced automation. In this work the conventional control approach is presented with programmable logic controllers, quality inspection and a possibility for fuzzy logic diagnostics. Furthermore, it offers ability to adapt the production according to the individual, assembly process and including different technologies tasks.

ACKNOWLEDGMENT

This research was funded by the European Regional Development Fund within the OP “Research, Innovation and Digitalization Programme for Intelligent Transformation 2021-2027”, Project CoC “Smart Mechatronics, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies”, No. BG16RFPR002-1.014-0005.

REFERENCES

- [1] V. Boyko, J. Weber, Cycle Time-Based Fault Detection and Localization in Pneumatic Drive Systems, DOI:10.3390/act13110447, 2024
- [2] X. Zhao, Z. Chen, J. Li, Research on Pneumatic Manipulator Control Methods, DOI: 10.18686/aitr.v2i3.4400
- [3] N. Asadi, Flexibility in Assembly Systems using Product Design, Ph.D. dissertation, Mälardalen University Press Dissertations., Printed by E-Print AB, Stockholm, Sweden, 2017.
- [4] SMC Networks. FAS-200 User Manual. 2020, p. 97.



- [5] SMC International Training.
<https://www.smctraining.com/>
- [6] A. Ahmadi, C. Cherifi, V. Cheutet, Y. Ouzrout. “Recent Advancements in Smart Manufacturing Technology for Modern Industrial Revolution: A Survey”. Journal of Engineering and Information Science Studies, 2020. p. 21, hal-03054284.
- [7] M.P. Groover, “Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing”, Harlow, Pearson Education, 2014.
- [8] S. Liang, M. Rajora, “Intelligent Manufacturing Systems: A Review,” in International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research Vol. 7, No.3, (2018), [Online] Available: <https://www.researchgate.net/publication/324598110>.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ЛАБОРАТОРИЯ С 7.6 „ИНТЕЛИГЕНТНИ ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ КЪМ ЦК "ИНТЕЛИГЕНТНИ МЕХАТРОНИ, ЕКО- И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ"

THE LABORATORY C 7.6 "INTELLIGENT ENERGY SAVING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES" AT THE CC "INTELLIGENT MECHATRONIC, ECO AND ENERGY SAVING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES"

Stanimir Stefanov

Technical University – Sofia, Plovdiv branch

Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract

The report presents an account of the activities and equipment built related to the research laboratory C 7.6 (previously designated C 7.5) "Intelligent Energy-Saving Systems and Technologies" at the Competence Center "Intelligent Mechatronic, Eco- and Energy-Saving Systems and Technologies", funded through the Operational Program "Science and Education for Smart Growth" 2014-2020. The provided and installed equipment is described, including photovoltaic systems for electricity production, demonstration models, computer equipment and available software.

Keywords: Intelligent energy-saving systems

ВЪВЕДЕНИЕ

Лаборатория С 7.6 (С 7.5) „Интелигентни енергоспестяващи системи и технологии“ към Центъра за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии" е една от специализираните лаборатории изградени в центъра за компетентност, ситуиран в ТУ – София, филиал Пловдив. Проектът е финансиран чрез Оперативна програма „Наука и образование за интелигентен растеж“ 2014-2020“.

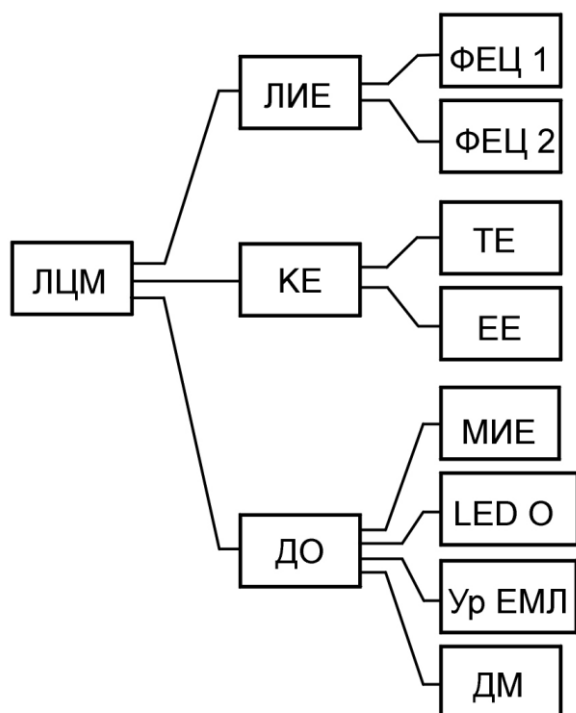
Основната идея при създаването на лабораторията е чрез използването на системи и устройства, свързани в обща кому-

никационна мрежа в реално време да се събират данни за добиваната и разходваната енергии от конкретен консуматор или група консуматори. Въз основа на анализа на получените данни да се оптимизира разхода на енергия на изследваните консуматори. В една по-далечна перспектива, натрупаният опит може да се прилага при проектирането на пасивни сгради и обекти с минимизирано енергопотребление. В допълнение идеята е развита и по отношение на производството на електроенергия от възобновяеми източници, оценка и прогностика на произвежданото количество електроенергия.

ИЗЛОЖЕНИЕ

При стартирането на проекта Център за компетентност (ЦК) се формира идеята за създаване на специализирана лаборатория за изследване на енергоспестяващи системи и технологии. На фиг. 1 е представена концепцията от етапа за лаборатория С 7.5 (сегашно означение С 7.6) „Интелигентни енергоспестяващи системи и технологии“.

Съгласно представената концепция е било предвидено изграждането на локален център за мониторинг (ЛЦМ) в който да се събира и обобщава информацията за разпределението на енергийните потоци в наблюдавани и контролирани обекти. Тези обекти могат да бъдат потребители с различни товарни графици. В началния етап на развитие на системата е предвидено това да са обекти на територията на ТУ-София, филиал Пловдив.



Фиг. 1. Концепция за лаборатория С 7.6

Първата група от основните елементи на концепцията са два локални източника

на електроенергия (ЛИЕ), монтирани в два от учебните корпуси.

Първият ЛИЕ е фотоволтаична система (ФЕЦ 1) с мощност 22 kWp и прилежащото ѝ оборудване – фиг 2 и 3:



Фиг. 2. ФЕЦ 1



Фиг. 3. ФЕЦ 1

- два трифазни инвертора – мрежови и хибриден, всеки с мощност 10kW, акумулаторна батерия с мощност 20kWh и зарядна станция за електромобили с мощност до 20kW.

Вторият ЛИЕ е фотоволтаична система (ФЕЦ 2) с мощност 5,5kWp и един еднофазен мрежови инвертор с мощност 5kW – фиг. 4.



Фиг. 4. ФЕЦ 2

ФЕЦ 2 е разположена върху покрива на югозападната част на т. нар. 4^{ти} учебен корпус на ТУ - София, филиал Пловдив.

Втората група от основните елементи е предназначено за контрол на консумираната енергия (КЕ). То включва широк спектър от измервателни устройства – ултразвукови топломери, еднофазни и трифазни електромери, интелигентни контакти, сензори за температура, за осветление, за присъствие и др., основната част от които са доставени през първия етап на проекта. Предвидено е те да поддържат комуникационни протоколи и по-конкретно M-bus, позволяващи свързването им в локални мрежи, като получаваните данни ще се събират чрез контролери и ще се изпращат към ЛЦМ.

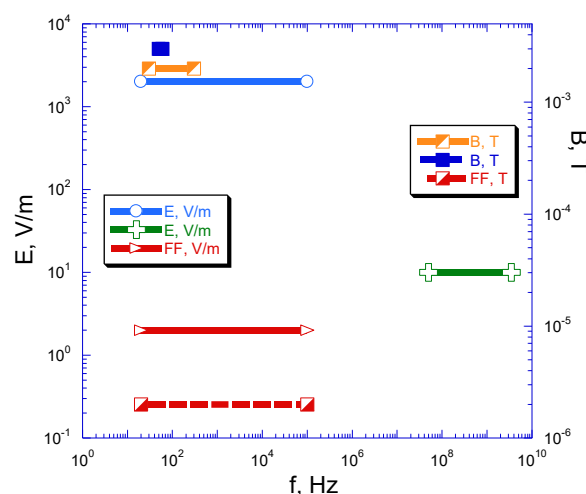
Третата група, наречена допълнително оборудване (ДО), доставено за лабораторията включва:

1. Мобилен източник на енергия (МИЕ), (чието цялостно конфигуриране предстои). Този МИЕ представлява фотоволтаична система с мощност 3kWp с един еднофазен хибриден инвертор и акумулаторна батерия,

монтирани върху подвижна платформа;

2. LED осветители (LED O) – това са различни осветители, включително и улични, използващи в конфигурацията си фотоволтаични панели, за производство на необходимата им електроенергия, LED източници на светлина и контролери за управлението им;

3. Уреди за регистриране на електромагнитни лъчения (Ур ЕМЛ) – това са уреди за измерване на силовите характеристики на електрически и на магнитни полета, и други параметри на околната среда като шум, слънчева радиация, наличие на радон във въздуха и пр. На фиг. 5[1] са представени параметрите и обхватите на някои от тях, използвани за измерване на интензитета на електрическото поле (E) и магнитната индукция (B), както и на плоско поле (FF) в тримерна координатна система и в зависимост от честотата на лъченията.



Фиг. 5. Уреди за измерване на ЕМЛ

4. Демонстрационни макети (ДМ) - изработени са и са доставени два демонстрационни макета – един на ветрогенератор и един на фотоволтаична система. Идеята за тях е да се извършват както демонстрации пред студенти, така и изследвания от

тях относно възможностите за преобразуване на енергията на вятъра и слънцето, като крайната цел на тези демонстрации е приобщаването на студенти и докторанти им към изследователската дейност провеждана в ЦК.

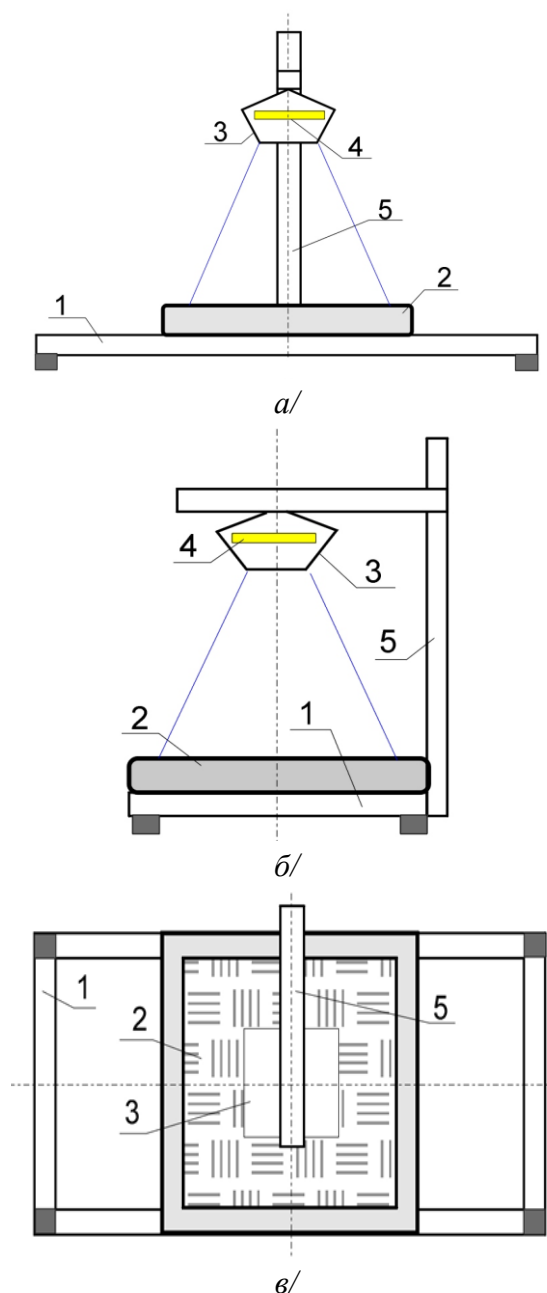
Демонстрационният макет на фотоволтаичната система е предназначен за изпитване на фотоволтаични панели с малка мощност (5W) от различен тип - монокристални и поликристални на различни производители.

Общият вид на макет е даден на фиг. 6 [1]. Той включва следните съставни елементи: основа (1), стойка за закрепване на светлинния източник (5), източник на светлина (4) и рефлектор (3). Изпитваният фотоволтаичен панел (2) се фиксира върху основата чийто размери са съобразени с размерите на соларните панели със споменатата мощност. Височината на рефлектора и съответно - на източника може да се регулира, така че падащият светлинен поток да покрива цялата площ на изпитвания панел. Източникът на светлина се реализира с използване на 12 светодиода с предварително известни спектър, мощност и светлинен поток на излъчването в групи от по 3 червени, 3 жълти, 3 зелени и 3 сини LED. Светлинният поток се регулира в границите от 40% до 100% спрямо номиналния поток посредством регулиране на тока на диодите.

Посоченото до тук оборудване е обединено в т.нар. „Лабораторен комплекс за изследване на работата и енергийната ефективност на ВЕИ“.

Лабораторният комплекс за изследване на работата и енергийната ефективност на ВЕИ включва общо 32 различни артикула. Извън лабораторния комплекс е локалният център за мониторинг (ЛЦМ), включващ два сървъра, 10 работни станции, интерактивен мулти тъч екран за визуализация на

енергийни данни, техника и специализирано програмно осигуряване,



Фиг. 6. Конструкция на ДМ за изпитване на PV панели

включващо към момента програмна пакет за изграждане на пасивни сгради Passive House Planning Package PHPP 10,



софтуер за проектиране на фотоволтаични системи PV*SOL и програмния продукт VISIO.

ПУБЛИКАЦИИ

През първия етап на проекта, от екипа, работещ към лабораторията, са реализирани два доклада:

Първият от тях е със заглавие „Перспективи за развитие на лаборатория 7.5 „Интелигентни енергоспестяващи системи и технологии“ към ЦК "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии" и автори доц. д-р Георги Ганев и доц. д-р Станимир Стефанов, Технически Университет София, филиал Пловдив, представен на симпозиума „Международна научна конференция „Мехатроника, еко и енергоспестяващи системи и технологии“ Габрово 23“

Втория доклад е със заглавие „Изследване на разпределението на електромагнитни полета“ с автори доц. д-р Станимир Стефанов и доц. д-р Георги Ганев, Технически Университет София, филиал Пловдив, представен на симпозиума „Международна научна конференция „Мехатроника, еко и енергоспестяващи системи и технологии“ Пловдив 23“

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изследователска лаборатория С 7.6 (предходно означение С 7.5) „Интелигентни енергоспестяващи системи и технологии“ към Центъра за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии" е една от специализираните лаборатории изградени в центъра за компетентност. Проектът бе финансиран чрез Оперативна програма „Наука и образование за интелигентен растеж“ 2014-2020“.

Основната идея при създаване на лаборатория 7.5, е чрез използването на системи и устройства, свързани в обща комуникационна мрежа в реално време да се събират данни за добиваната и разходваната енергии от конкретния консуматор или група консуматори, и въз основа на анализа на получените данни да се оптимизира разхода на енергия на изследваните консуматори.

Лабораторията не е изградена все още в завършена цялост поради недоставено през първия етап технологично и софтуерно оборудване, но може да функционира и предоставя услуги, свързани с оценка на енергийното потребление и електромагнитния фон. Също така в лабораторията могат да бъдат извършвани изследвания свързани с добива на електроенергия от фотоволтаични системи. В тази връзка, е предвидено натрупвания опит да се споделя с потенциални клиенти, интересувачи се от обекти с минимизирано енергопотребление, тяхната експлоатация, комбинирано с производството на енергия от покривни фотоволтаични централи.

Също така, наличието на лабораторията, технологичното ѝ и софтуерното ѝ оборудване позволяват да се извършват демонстрации на възможностите за преобразуване на енергия на различни възобновяеми източници на енергия пред студенти, както за целите на тяхното обучение, така и за приобщаването им към изследователската дейност, провеждана в Центъра за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна



трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ганев Г., С. Стефанов. Перспективи за развитие на лаборатория 7.5 „Интелигентни енергоспестяващи системи и технологии“ към ЦК "Интелигентни мехатронни, еко- и

енергоспестяващи системи и технологии. „Международна научна конференция „Мехатроника, еко и енергоспестяващи системи и технологии“ Габрово 23“.2023. ISSN: 2815-4916

[2] Стефанов С., Г. Ганев. Изследване на разпределението на електромагнитни полета. „Международна научна конференция „Мехатроника, еко и енергоспестяващи системи и технологии“ Пловдив 23“. 2023. . ISSN: 2815-4916.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ПЕРСПЕКТИВИ ЗА РАЗВИТИЕ НА ЛАБОРАТОРИЯ С 7.6 „ИНТЕЛИГЕНТНИ ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ КЪМ ЦК "ИНТЕЛИГЕНТНИ МЕХАТРОНИКИ, ЕКО- И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ"

PROSPECTS FOR DEVELOPMENT OF LABORATORY C 7.6 "INTELLIGENT ENERGY SAVING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES" AT THE CC "INTELLIGENT MECHATRONIC, ECO AND ENERGY SAVING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES"

Stanimir Stefanov

Technical University – Sofia, Plovdiv branch

Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract

The report presents a report on the vision related to the research laboratory C 7.6 (previously designated C 7.5) "Intelligent Energy-Saving Systems and Technologies" at the Competence Center "Smart Mechatronic, Eco- and Energy-Saving Systems and Technologies", funded through the Operational Program "Research, Innovation and Digitalization Programme for Intelligent Transformation 2021-2027". The report describes the main guidelines for the development of the scientific and practical applied activities provided by the laboratory team.

Keywords: Intelligent energy-saving systems

ВЪВЕДЕНИЕ

Лаборатория С 7.6 (С 7.5) „Интелигентни енергоспестяващи системи и технологии“ към Центъра за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии" е една от специализираните лаборатории изградени в центъра за компетентност, ситуиран в ТУ – София, филиал Пловдив. Проектът е финансиран чрез Оперативна програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г.

Основната идея при създаването на лабораторията в предходния етап е била чрез

използването на системи и устройства, свързани в обща комуникационна мрежа в реално време да се събират данни за добиваната и разходваната енергии от конкретен консуматор или група консуматори. Въз основа на анализа на получените данни да се оптимизира разхода на енергия на изследваните консуматори. В допълнение идеята е била развита и по отношение на производството на електроенергия от възобновяеми източници, оценка и прогностика на произвежданото количество електроенергия. През настоящия етап идеите са доразвити и с предлагане на прогностика и съгласуване по време на



произведената и потребената енергия.

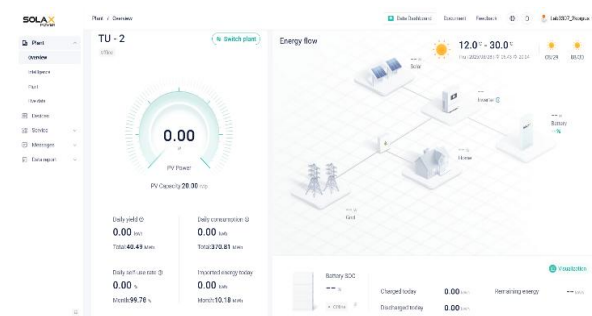
ИЗЛОЖЕНИЕ

При стартирането на проекта Център за компетентност (ЦК) се е формирала идеята за създаване на специализирана лаборатория за изследване на енергоспестяващи системи и технологии. Съгласно концепцията е било предвидено изграждането на локален център за мониторинг (ЛЦМ) в който да се събира и обобщава информацията за разпределението на енергийните потоци в наблюдавани и контролирани обекти. В началния етап на развитие на системата е било предвидено това да са обекти на територията на ТУ-София, филиал Пловдив. От предвидените през предходния етап системи за управление и мониторинг на територията на ТУ-София, филиал Пловдив към момента е изградена част от локалния център за мониторинг, най-вече в т.нар. хардуерна част, чието развитие предстои да се допълва с нови елементи и програмно осигуряване, неосъществени през предходния етап на проекта поради неизпълнени обществени поръчки и липса на изследователи с квалификация в областта на програмното осигуряване.

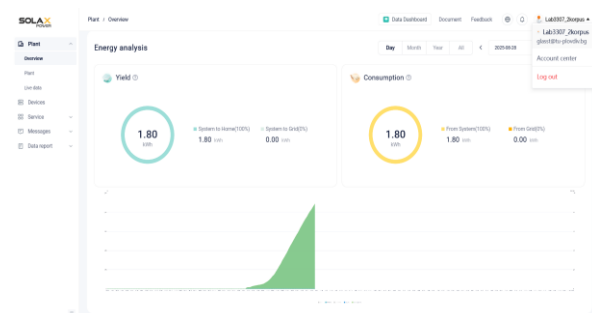
Предстоящо е закупуване на недоставени през предходния етап на проекта елементи свързани с управлението и регулирането на отоплителни системи, както и изграждане на цялостна система за мониторинг на потреблението на обект от ТУ-София, филиал Пловдив.

На база на доставеното до момента програмно осигуряване, оборудване и инсталираните фотоволтаични централи на два от обектите на филиала се извършва мониторинг на потреблението на единия от учебните корпуси и производството на електроенергия от двете ФВИЦ, посред-

ством интернет платформата на фирмата SOLAX POWER [1] – фиг. 1 и 2, с чийто инвертори са изградени фотоволтаичните централи, зарядната автомобилна станция и акумулиращата батерия – фиг. 3, 4 и 5.



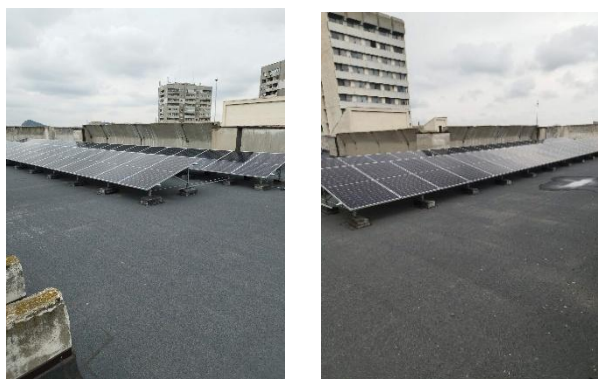
Фиг. 1.



Фиг. 2.



Фиг. 3.



Фиг. 4.



Фиг. 5.

Предстои закупуване и монтиране на стационарен пиранометър [2][3] с който да се следи непрекъснато слънчевата радиация в зоната на едната фотоволтаична централа. Данните от него биха могли да се използват комплексно при анализи и прогнозиране на производството и за двете ФЕЦ, поради тяхното сравнително близко географско местоположение. Наличието на споменатия уред би спомогнало за извършването на прогностика на базата на предходни данни и за сравнение на данните, давани от симулационния продукт PV*SOL и реалните. Също така, данните биха могли да се споделят и с партньорски организации, имащи в близост ФЕЦ и да се извършва комплексен анализ на енергийната ефективност в производството на електроенергия от слънчевата радиация. За цялостна окомплектовка на инструментите за мониторинг и анализ, свързани с изграде-

ни фотоволтаични централи се очаква да бъде закупена и термовизионна камера – фиг. 6[4]



Фиг. 6.

с която да се следи температурата на фотоволтаични панели по време на тяхното функциониране и във връзка с анализ на тяхната експлоатационна годност. Същата, също така ще се използва и при мониторинг на сгради, относно тяхната топлопроводност и термоизолационните качества на използваните в тях материали. Още едно приложение на тази камера е извършване на мониторинг на електроразпределителни табла и шкафове от всякакъв вид в промишлени, административно битови и жилищни сгради за определяне на температурата вътре в таблата и на елементи от разпределителните им уредби, с цел откриване и превенция на развитието на повреди в техните елементи и апаратура.

За допълване на софтуерния пакет относно енергийната ефективност на сгради



през настоящия етап се очаква да бъде закупен и софтуерния продукт SketchUp, който представлява платформа за работа със закупените вече софтуерни пакети „Passive House Planning Package“ и „designPH 2.0“. С негова помощ създават конфигурации на сгради и параметрите им, нужни за оценка на енергийната ефективност. Пример за такива параметри са географско разположение на сградата, нейната ориентираност спрямо слънцето, материалите и тяхната топлопроводност от които е изградена сградата, дебелината на стените, вида на дограмата, вида на покрива, покривната изолация и т.н.т.

В допълнение към изградената зарядна станция за автомобили е предвидено и изграждане на такава за електро велосипеди, включена в система за споделен достъп. Идеята е да се използват електровелосипеди с цялостна система за мониторинг и контрол на местоположението с цел изследване на енергийните потребности на такива лични превозни средства и оценка на тяхната електроенергийна ефективност при ежедневна употреба в градски условия.

По отношение на възможностите за развитие на взаимодействието с бизнеса и предлагане на услуги дейността на лабораторията е насочена към следните потребители - административно – битови сгради, сгради с търговско и промишлено предназначение, жилищни сгради, като основанието е следното:

Пазарът на технологии за управление и оптимизиране на енергийното потребление и разходите за вода се ръководят от нарастването на цените на енергията и водата, техният недостиг в световен мащаб, както и от стремежа за намаляване на въглеродните емисии и спестяване на първични енергоносители и водни ресурси. Това намаляване и спестяване е възможно да се осъществява на базата на мониторинг,

диспечеризация и прогнозиране на нуждите. Самите нужди на административно – битови сгради, сградите с търговско и обществено предназначение и на жилищни сгради се определят основно от развиваните дейности в съответните сгради, от дневните и почасовите климатичните условия, от географското разположение, тяхната ориентация спрямо слънцето, от генерираните в тях топлинни излъчвания и не на последно място от вида потребители в тях и от човекопотока. При производствените обекти пазара на енергийна ефективност се определя от характера на производствените процеси, от свързаните със тях енергийни и водни потребности, и от климатичните условия, като тук лесно могат да бъдат включени и собствени източници за производство на електроенергия от ВЕИ, чието производство и потреблението на които да е необходимо да се съгласуват или/и управляват по време. Изграждането на подобни системи за управление съществува като необходимост още от възникването на потреблението на електрическа енергия от субекти от всякакъв тип и е свързано с оптимизиране на финансовите разходи. В последните 20-25 години за целите на това оптимизиране все по-широко използване получава така нареченият „Интернет на нещата“, сградната автоматизация и енергийната пасивност на сградите по отношение от нуждата за ползване на външна енергия за отопление, осветление и климатизация, както и за промишлени технологични процеси, информационни услуги и прочие. Този пазар обхваща потребители с различни по брой електроенергийни и топлинни потребителски съоръжения и характеристики на сградите, което предоставя широки възможности за реализация на идеи и системи за контрол и управление. Очакваното развитие на дейността на лабораторията е свързано с развитието на топлинната ефективност на самите сградни



конструкции, прилежащите към тях съоръжения, оптимизирането на производствените процеси, инсталирането на генериращи мощности, ползващи ВЕИ, системи за съхранение и възпроизводство, съгласуване по време на генерираната, употребената и реализираната на пазара енергия с предварителна прогностика на съответните количества и финансови потоци. Основни насоки, от които ще се води дейността в лабораторията в споменатия до тук аспект ще е управление и регулиране на потоците от топлинна и електрическа енергия, както и на вода, опционално свързани с времето на пребиваването на лица в конкретни помещения. Като пример може да се дадат измерване на електрическата енергия, употребена от наематели, откриване на ненужно изразходване на такава, включително и на топлинна, установяване на течове на вода, прогностика на наличието на излишна енергия, генерирана от мощности, ползващи ВЕИ и предлагане ѝ на пазара, оптимизиране на разходи, свързани с производствени нужди и процеси.

Като основни заинтересовани лица от предлаганите от лабораторията услуги могат да се посочат например Камара на инженерите в инвестиционното проектиране, Асоциация на индустриалния капитал в България, фирми разположени в Тракия Икономическа зона, общинските и областните управи, учебни заведения и бизнес-центрове, и центрове отдаващи помещения под наем.

ПУБЛИКАЦИИ

По отношение на публикациите през първия етап на проекта, от екипа, работещ към лабораторията, са реализирани два доклада. През настоящия етап е предвидено да се докладват научни и практически приложни постижения, които да бъдат

дат представени в минимум по три доклада годишно в кватил Q4 – Scopus и WoS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лабораторията С 7.6 „Интегрирани енергоспестяващи технологии“ предлага научни и приложни изследвания в тематична област „Мехатроника и микроелектроника“ от Иновационната стратегия за интелигентна специализация 2021-2027 г. през настоящия етап се предвижда да развива дейности в следните направления:

1. Създаване на модели и алгоритми за прогностика на потребяваната и произвежданата енергия;
2. Създаване на модели и алгоритми за прогностика на потребяваната и произвежданата енергия, и тяхното съгласуване по време;
3. Разработване на системи за мониторинг, оперативно управление и контрол на производството, и потреблението на енергия;
4. Оптимизиране потреблението на енергия в различни области на потребление – промишлени, административно-битови, социални, културни и пр..
5. Анализ на енергийно потребление.
6. Изследване разпределението на електромагнитни полета, създавани от технически съоръжения и апаратура.
7. Демонстрации на възможности за преобразуване на енергия на различни възобновяеми източници на енергия пред студенти, както за целите на тяхното обучение, така и за приобщаването им към изследователската дейност, провеждана в Центъра за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.



Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

- [1] <https://global.solaxcloud.com/green/#/overview?siteId=1782682368782995458&onlyView=1>
- [2] <https://bioevibul.com/416-pyr-bta-piranometer-senzor>
- [3] <https://bioevibul.com/1449-labquest-3-moshten-samostoiatelen-interfeys>
- [4] <https://www.mepro.bg/produkti/portativni-termovizionni-kameri/2/product-16/>



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ПОСТИЖЕНИЯ И УСТОЙЧИВОСТ НА ДЕЙНОСТИТЕ В ЛАБОРАТОРИЯ „ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ ТЕХНОЛОГИИ ЗА УДЪЛЖАВАНЕ НА ЖИЗНЕНИЯ ЦИКЪЛ И ПОВИШАВАНЕ НА ЕКСПЛОАТАЦИОННАТА СИГУРНОСТ“

ACHIEVEMENTS AND SUSTAINABILITY OF ACTIVITIES IN THE LABORATORY “ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES FOR LIFE CYCLE EXTENSION AND IMPROVEMENT OF OPERATIONAL RELIABILITY“

Angel Petrov Anchev

Technical University Gabrovo

Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract

This report presents the results achieved in the framework of Project No. BG05M2OP001-1.002-0023 – Competence Center "Intelligent Mechatronic, Eco- and Energy-Saving Systems and Technologies", implemented in the Laboratory "Energy-Saving Technologies for Life Cycle Extension and Enhancement of Operational Reliability". Within the project, significant scientific results have been obtained, patent and utility model applications have been filed, modern research infrastructure has been established, and industrial research services have been provided to partner companies. The achievements demonstrate how the application of surface plastic deformation and advanced mechanical testing methods on specimens can improve key surface integrity parameters, which directly determine the fatigue life and operational reliability of metallic components.

Keywords: surface plastic deformation, diamond burnishing, surface engineering, surface integrity, ISO 17025.

ВЪВЕДЕНИЕ

В съвременната индустрия повишаването на качеството и дълготрайността на компонентите е основен приоритет. Постигането на тези цели изисква модерно оборудване за изпитване на образци по стандартизирани и нестандартизирани методи, което осигурява надеждни и възпроизводими резултати. В рамките на проект № BG05M2OP001-1.002-0023 беше изградена лаборатория, оборудвана с високотехноло-

гична апаратура, която позволява провеждането на широк спектър от изпитвания и осигурява връзка между научно-приложните изследвания и индустриалната практика. Научните изследвания, провеждани от екипа на лабораторията, намират своето потвърждение чрез резултатите, получени с помощта на закупеното оборудване. Това не само повишава достоверността на научните изводи, но и създава условия за предоставяне на изследователски и експери-

ментални услуги на бизнеса, подпомагайки разработването на по-надеждни и конкурентоспособни продукти.

Целта на настоящия доклад е да представи достиженията на екипа на лабораторията „Енергоспестяващи технологии за удължаване на жизнения цикъл и повишаване на експлоатационната сигурност“, както и да представи бъдещите перспективи пред дейността на лабораторията.

ИЗЛОЖЕНИЕ

1. НАУЧНИ ПОСТИЖЕНИЯ И ПРИНОС КЪМ ЗНАНИЕТО

През периода 2018–2023 г. екипът на лабораторията публикува над 30 статии [1–30], включително 14 в списания от Q1 и 13 в Q2 в международни индексирани журналы в WoS и SCOPUS, както и една монография [31], което показва високо научно признание на международно ниво. Основният научен фокус е прилагането и усъвършенстването на методи за повърхностно пластично деформиране, като например статичния метод диамантно заглаждане върху компоненти от метали и метални сплави, с цел повишаване на уморната дълготрайност, модифициране на микроструктурата на повърхностните слоеве, повишаване на микротвърдостта и износоустойчивостта, подобряване на корозионната устойчивост и по-стигане на благоприятно разпределение на остатъчните напрежения в дълбочина. Моделирането и експерименталното потвърждаване на полето на остатъчните напрежения е ключов принос, който допринася за оптимизация на технологичните параметри и предсказване на поведението на компонентите при динамични натоварвания. Подадена е заявка за патент [32], който материализира научните резултати в инженерни решения.

2. ОБОРУДВАНЕ И ВЪЗМОЖНОСТИ НА ЛАБОРАТОРИЯТА

Лабораторията разполага с машина за статични и динамични изпитвания Zwick/Roell Vibrophore 100 (фиг.1). Чрез нея се изследва не само поведението при статични натоварвания (опън, огъване) на стандартни и нестандартни образци, но и уморното поведение на образци при динамично натоварване с честота в диапазона от 30 Hz до 300 Hz.



Фиг. 1. Общ изглед на комбинирана машина за статични и динамични изпитвания Zwick/Roell Vibrophore 100

Софтуерът на комбинираната машина предлага широк избор от програми за статични изпитвания – от стандартни изпитвания на опън и огъване на метални образци до определяне на якост на полимерни материали и материали, използвани в денталната медицина, което разширява обхва-

та на приложимост на лабораторното оборудване.

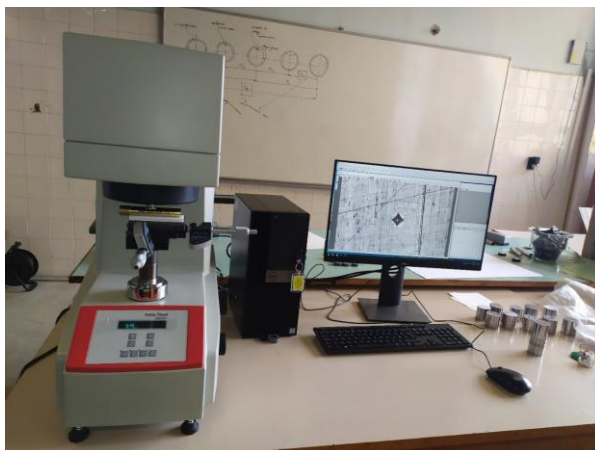
Полуавтоматичният микротвърдомер Zwick/Indentec ZHV μ -S работи с реални тежести в диапазона от 10 g до 2 kg, разпределени в осем подинтервала, което осигурява висока точност и възпроизводимост на резултатите. Методът на измерване е Vickers и е в съответствие с изискванията на международния стандарт ISO 6507-1. Уредът е подходящ за измерване на твърдост върху призматични и цилиндрични образци. Вградената CCD камера предава изображението на софтуерната система, която автоматично определя диагоналите на отпечатъка и изчислява стойностите на микротвърдостта.

Софтуерът позволява цифрово съхранение и статистическа обработка на резултатите, което е особено важно при изследване на ефекта от повърхностно пластично деформиране и термични обработки върху свойствата на материала. Това прави микротвърдомера полезен инструмент за

оценка на промените в повърхностния слой и връзката им с параметрите на Surface integrity.

3. ПРИЛОЖНИ РЕЗУЛТАТИ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ИНДУСТРИЯТА

Екипът на лабораторията поддържа партньорства с фирми от индустрията, предоставяйки изследователски услуги за оценка на механичните характеристики на материали. Участието в международно сравнително изпитване доказва надеждността на резултатите и повиши доверието на индустриалните партньори. То бе част от процеса по получаване на сертификат за акредитация съгласно ISO 17025, издаден от Българската служба по акредитация. Таблица 1 представя обхватът от акредитирани дейности съгласно заповедта за акредитация.



Фиг. 2. Общ изглед на полуавтоматичният микротвърдомер Zwick/Indentec ZHV μ -S



Таблица 1. Обхват на акредитираната лаборатория съгласно заповедта за акредитация [33]

№ по ред	Изпитвани продукти	Вид на изпитване/ характеристика	Обхват на изпитването, съгласно изискванията на метода	Методи за изпитване (стандартизирани/ валидирани)	Използвани технически средства
1	2	3	4	5	6
1	Метали и метални сплави	Якост на опън;	1÷5000 МПа	БДС EN ISO 6892-1	Vibrophore 100
		Граница на провлачване;	1÷4000 МПа	БДС EN ISO 6892-1	Vibrophore 100
		Относително удължение при разрушаване;	0 ÷ 100 %	БДС EN ISO 6892-1	Vibrophore 100
		Относително свиване при разрушаване;	0 ÷ 80 %	БДС EN ISO 6892-1	Vibrophore 100
		Ъгъл на огъване	0÷100 ⁰	БДС EN ISO 7438	Vibrophore 100
		Изпитване на твърдост по Vickers	0,01÷2 Kgf	БДС EN ISO 6507-1	ZHVμ-S
2	Заварени съединения от метални материали	Якост на опън – надлъжно на заваръчния шеф	1÷5000 МПа	БДС EN ISO 5178	Vibrophore 100
		Граница на провлачване - надлъжно на заваръчния шеф	1÷4000 МПа	БДС EN ISO 5178	Vibrophore 100
		Относително удължение - надлъжно на заваръчния шеф	0 ÷ 100 %	БДС EN ISO 5178	Vibrophore 100
		Относително свиване - надлъжно на заваръчния шеф	0 ÷ 80 %	БДС EN ISO 5178	Vibrophore 100
		Ъгъл на огъване	0÷100 ⁰	БДС EN ISO 5173	Vibrophore 100
		Якост на опън – напречно на заваръчния шеф	1÷5000 МПа	БДС EN ISO 4136	Vibrophore 100
		Максимална сила – напречно на заваръчния шеф	100÷100000 N	БДС EN ISO 4136	Vibrophore 100

В периода на проекта бяха изпълнени 10 договора за предоставяне на изследователски услуги с фирми от различни сектори на българската индустрия – машиностроене, рециклираща индустрия, енергетика и производство на метални изделия, което доказва приложимостта на резултатите в широк спектър от реални производствени процеси.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Постигнатите резултати, валидирани чрез публикуването им в индексирани международни журналы в световно известни бази данни, като WoS и SCOPUS, както и натурни изпитвания реализирани върху

закупеното оборудване, показват, че лабораторията е ключов фактор за трансфер на знания и технологии към индустрията. Благодарение на дейностите по приключилia първи етап на проекта, екипът на лабораторията е повишил значително компетенциите си.

Чрез модерното оборудване екипът на лабораторията ще продължи да извършва надеждна оценка на ефекта от приложението на Surface Engineering върху параметрите на Surface Integrity на компоненти от метали и метални сплави. Това ще позволи научните резултати да бъдат трансформирани в приложими решения, които



ще подпомагат конкурентоспособността на бизнеса и ще гарантират устойчиво развитие на дейностите на лабораторията в дългосрочен план.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Maximov JT, Duncheva GV. The correlation between surface integrity and operating behaviour of slide burnished components – a review and prospects. Applied Sciences, 2023, 13, 3313 (WoS; Q1; IF=2.7)
- [2] Maximov JT, Duncheva GV, Anchev AP, Dunchev VP, Argirov YB, Nikolova MP. Effects of heat treatment and diamond burnishing on fatigue behaviour and corrosion resistance of AISI 304 austenitic stainless steel. Applied Sciences, 2023, 13, 2570 (WoS; Q1; IF=2.7)
- [3] Duncheva GV, Maximov JT, Anchev AP, Dunchev VD, Argirov YB, Kandeveva-Ivanova M. Enhancement of the wear resistance of CuAl9Fe4 sliding bearing bushings via diamond burnishing. Wear 510-511 (2022) 204491 (WoS; Q1; IF=5)
- [4] Duncheva GV, Maximov JT, Anchev AP, Dunchev VP, Argirov YB, Ganev N, Drumeva DK. Improvement of surface integrity of CuAl8Fe3 bronze via diamond burnishing. Int J Adv Manuf Technol 119 (2022) 5885-5902 (WoS; Q1; IF=3.4)
- [5] Duncheva GV, Maximov JT, Anchev AP, Dunchev VP, Argirov Y. B. Multi-objective optimization of internal diamond burnishing process. Materials and Manufacturing Processes 37(4) (2022) 428-436 (WoS; Q1; IF=4.783)
- [6] Duncheva GV, Maximov JT, Dunchev VP, Anchev AP, Atanasov TP, Capek J. Single toroidal roller burnishing of 2024-T3 Al alloy implemented as mixed burnishing process. Int J Adv Manuf Technol (2020) DOI: 10.1007/s00170-020-06350-2 (WoS; Q1; IF=3.4)
- [7] Maximov JT, Duncheva GV, Anchev AP, Dunchev VP. Slide burnishing versus deep rolling – a comparative analysis. J Adv Manuf Technol 110 (2020) 1923-1939 (WoS; Q1; IF=3.4)
- [8] Maximov JT, Duncheva GV, Anchev AP, Dunchev VP. Smoothing, deep or mixed diamond burnishing of low-alloy steel components – optimization procedures. J Adv Manuf Technol 106 (2020) 1917-1929 (WoS; Q1; IF=3.4)
- [9] Maximov JT, Duncheva GV, Anchev AP, Ichkova MD. Slide burnishing – review and prospects. Int J Adv Manuf Technol 104 (2019) 785-801 (WoS; Q1; IF=3.4)
- [10] Dikova TD, Maximov JT, Gagov YV. Experimental and FEM investigation of adhesion strength of dental ceramic to milled and SLM fabricated Ti6Al4V alloy. Engineering Fracture Mechanics 2023 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfractmech.2023.109528> (WoS; Q1; IF=4.898)
- [11] Maximov J, Duncheva G, Anchev A, Dunchev V, Argirov Y. Improvement in Fatigue Strength of Chromium–Nickel Austenitic Stainless Steels via Diamond Burnishing and Subsequent Low-Temperature Gas Nitriding. Applied Sciences. 2024; 14(3):1020. <https://doi.org/10.3390/app14031020> (Q1; IF=2.5)
- [12] Maximov J, Duncheva G, Anchev A, Dunchev V, Todorov V, Argirov Y. Influence of an Ageing Heat Treatment on the Mechanical Characteristics of Iron-Aluminium Bronzes with β -Transformation Obtained via Centrifugal Casting: Modelling and Optimisation. Metals. 2023; 13(12):1930. <https://doi.org/10.3390/met13121930> (Q1 IF=2.6)
- [13] Maximov J, Duncheva G, Anchev A, Dunchev V, Daskalova P. Modified Split



- Mandrel Method and Equipment to Improve the Fatigue Performance of Structural Components with Fastener Holes. *Metals*. 2024; 14(3):303. <https://doi.org/10.3390/met14030303> (Q1 IF=2.6)
- [14] Maximov JT, Duncheva GV, Anchev AP, Dunchev VP, Argirov YB, Todorov VP, Mechkarova T. Effects of heat treatment and severe surface plastic deformation on mechanical characteristics, fatigue and wear of Cu-10Al-5Fe bronze. *Materials* 2022, 15, 8905 (WoS; Q2; IF=3.4)
- [15] Maximov JT, Dikova TD, Duncheva GV, Georgiev GP. Influence of factors in the photopolymerization process on dental composites microhardness. *Materials* 2022, 15, 6459, <https://doi.org/10.3390/ma15186459> (WoS; Q2; IF=3.4)
- [16] Maximov JT, Duncheva GV, Anchev AP, Dunchev VP, Argirov YB. Effect of Diamond Burnishing on Fatigue Behaviour of AISI 304 Chromium-Nickel Austenitic Stainless Steel. *Materials*. 2022; 15(14):4768. <https://doi.org/10.3390/ma15144768> (WoS; Q2; IF=3.4)
- [17] Duncheva GV, Maximov JT, Anchev AP, Dunchev VP, Argirov YB, Ganev N, Capek J. Fatigue strength improvement in CuAl8Fe3 bronze via diamond burnishing. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng* (2021) 43:569 DOI: 10.1007/s40430-021-03296-8 (WoS; Q2; IF=2.361)
- [18] Duncheva GV, Maximov JT, Anchev AP, Dunchev VP, Argirov YB. Improvement in wear resistance performance of CuAl8Fe3 single-phase aluminum bronze via slide diamond burnishing. *J Mater Eng and Perform* 31 (2022) 2466-2478 (WoS; Q2; IF=2.3)
- [19] Maximov JT, Duncheva GV, Dunchev VP, Anchev AP. Different strategies for finite element simulations of static mechanical surface treatment processes—a comparative analysis. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng*. 43, 371 (2021) DOI: 10.1007/s40430-021-03085-3 (WoS; Q2; IF=2.361)
- [20] Duncheva GV, Maximov JT, Dunchev VP, Anchev AP, Atanasov TP. Improvement in Fatigue Performance of 2024-T3 Al Alloy Via Single Toroidal Roller Burnishing. *Journal of Materials Engineering and Performance* 30(3) (2021) 2256–2266 (WoS; Q2; IF=2.3)
- [21] Duncheva GV, Maximov JT, Anchev AP, Dunchev VP, Atanasov TP, Capek J. Finite element and experimental study of the residual stresses in 2024-T3 Al alloy treated via single toroidal burnishing. *J Braz Soc Mech Sci Eng* (2021) DOI: 10.1007/s40430-020-02775-8 (WoS; Q2; IF=2.361)
- [22] Maximov JT, Duncheva GV, Anchev AP, Dunchev VP, Capek J. A cost-effective optimization approach for improving the fatigue strength of diamond-burnished steel components. *J Braz Soc Mech Sci Eng* 43(1), 33 (2021). DOI: 10.1007/s40430-020-02723-6 (WoS; Q2; IF=2.361)
- [23] Maximov JT, Duncheva GV, Anchev AP, Dunchev VP, Ichkova MD. Improvement in fatigue strength of 41Cr4 steel through slide diamond burnishing. *J Braz Soc Mech Sci Eng* (2020) 42:197 DOI: 10.1007/s40430-020-02276-8 (WoS; Q2; IF=2.361)
- [24] Duncheva G, Maximov J, Anchev A, Dunchev V, Argirov Y, Velkov S. Modeling and Optimization of Surface Integrity and Sliding Wear Resistance of Diamond-Burnished Holes in Austenitic Stainless Steel Cylinder Lines. *Machines*. 2023; 11(9):872. <https://doi.org/10.3390/machines11090872> (Q2 IF=2.1)
- [25] Maximov J, Duncheva G. Effects of Cryogenic- and Cool-Assisted Burnishing on the Surface Integrity and Operating Behavior of Metal Components: A Review and Perspectives. *Machines*. 2024; 12(5):312. <https://doi.org/10.3390/machines12050312>
- [26] A. Anchev. Influence of the process parameter on the micro-hardness obtained of diamond burnished AISI 304L stainless steel. *Journal of Technical University Gabrovo*. 64 (2022) 45-49. ISSN 1310-6686
- [27] A. Anchev. D. Drumeva. Experimental study of friction coefficient in diamond burnishing of CuAl8Fe3 bronze. *Journal of Technical University Gabrovo*. 62 (2021) 34-37. ISSN 1310-6686
- [28] A. Anchev. Enhancement of fatigue strength of bronze CuAl9Fe4 via diamond burnishing.



- Journal of Technical University Gabrovo. 62 (2021) 24-28. ISSN 1310-6686
- [29] Duncheva G., A. Anchev, D. Drumeva. Diamond Burnishing process efficiency to increase the wear resistance of sliding bearing bushing made of CuAl8Fe3 bronze. Journal of Technical University Gabrovo. 62 (2021) 3-10. ISSN 1310-6686
- [30] Anchev. A, V. Dunchev, P. Daskalova, Fatigue behavior experimental study of specimens with fastener holes in 2024-T3 aluminum alloy subjected to cold expansion via modified split mandrel method. International scientific conference „Mechatronics, eco- and energy saving systems and technologies“ Gabrovo 23. 155-163
- [31] Duncheva G. Surface Integrity през призмата на Surface Engineering. PH Vasil Aprilov. Gabrovo. 2023 ISBN: 978-954-683-691-5.
- [32] Maximov JT, GV Duncheva, rotary surface processing device. Application for a Patent for an Invention. №: 113743/10.07.2023 г.
- [33] Anchev A. Accreditation according to ISO 17025 – possibilities and field of application in mechanical testing of metals. International scientific conference „Mechatronics, eco- and energy saving systems and technologies“ Plovdiv 23.42-48.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ИЗСЛЕДВАНЕ НА БЕЗКОНТАКТНА СИСТЕМА ЗА ЗАРЕЖДАНЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ АВТОМОБИЛИ ПРИ РАЗЛИЧНО НИВО НА РАЗРЯД НА БАТЕРИЯТА

RESEARCH OF A WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEM FOR CHARGING ELECTRIC VEHICLES AT DIFFERENT BATTERY DISCHARGE LEVELS

Nikolay Madzharov

*Technical University of Gabrovo, BG
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"*

Desislav Iliev

*Technical University of Gabrovo, BG
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"*

Abstract

This paper presents a laboratory model of a contactless charging system for electric vehicles. Since the study of all processes - mechanical, electrical and electromagnetic - in such systems is very complex, a model of such a system was developed on a scale of 1:4. An additional resonant circuit was introduced, with the help of which it became possible to transfer energy with an efficiency greater than 80% at a distance greater than $D/4$ (D - diameter of the transmission coil of the system). A series of experiments were conducted at distances greater than $D/4$ at different load resistances and the efficiency of the developed model remained greater than 80%.

Keywords: Wireless Power Transfer System, Resonant Circuit, Load Impedance.

ВЪВЕДЕНИЕ

През последното десетилетие електрическите автомобили заемат все по-голяма процент на продажби в световен мащаб. Това се дължи на много фактори, като основния от тях е да се намали отделянето на вредни емисии от автомобилния транспорт, които съставят не малка част от всички вредни вещества, отделяни в атмосферата от различни човешки дейности [1-3]. Както всяко едно техническо средство, електрическите автомобили имат определени предимства пред класическите автомобили с двигател с вътрешно горене - липса на вредни емисии, по-безшумни са в сравнение с класическите автомобили и много други, но също така имат и опреде-

лени недостатъци, които възпрепятстват тяхното по-бързо налагане на пазара. Основните от тях са:

- малък пробег с едно зареждане на акумулаторната батерия;
- продължителното време на заряд на батерията;
- наличието на галванична връзка при съществуващите на пазара зарядни станции в момента на зареждане на електромобила, което е предпоставка за различни повреди (износване на механичните контакти, пробиви в изолацията и др.) и най-важното - възможност от поражения от електрически ток при работа на човек с тези системи.



Пробега на електрическите автомобили може да се увеличи с увеличаване на капацитета на акумулаторните батерии или с увеличаване на енергийната плътност на акумулаторите. Увеличаването на капацитета от своя страна води до увеличаване на масата на автомобила или така нареченото мъртво тегло, което води до увеличаване на разхода на електрическа енергия за изминати километри.

Намаляване на времето на заряд на автомобила може да се осъществи посредством бързи зарядни станции, което от своя страна води до други два проблема: допълнително и много често пиково натоварване на електропреносната мрежа и съкращаване на живота на акумулаторната батерия.

Едно от решенията на горните проблеми може да стане с въвеждането на безконтактни системи за заряд на електрически автомобили, които позволяват да се решат тези проблеми по следните начини:

- чрез дозареждане на електромобила по време на движение или кратък престой (на светофар или при временно пребиваване на паркинг) може да се осъществява частично зареждане на батерията, като по този начин се съкращава времето за пълнен заряд след като приключване на пътуването с него;

- в следствие на дозареждане на електрическия автомобил по време на движение или кратките престои по време на пътуването, акумулаторната батерия ще е с по-малко ниво на разряд и по-рядко ще се налага бърз заряд на акумулаторната батерия;

- чрез използването на безконтактна система за зареждане на електромобили директно се избягва галваничната връзка между зарядната станция и превозното средство и се елиминират свързаните с това проблеми, изложени по-горе.

РАЗРАБОТВАНЕ НА ЛАБОРАТОРЕН МАКЕТ

Съществуват три основни предизвикателства при разработването на система за безконтактно зареждане на електрически превозни средства, както е посочено по-долу:

- диаметърът на приеманата намотка трябва да позволява монтаж във всички видове електрически превозни средства - от малки градски автомобили до автобуси и превозни средства с висока проходимост.

- пътният просвет на превозното средство (клиренса), т.е. разстоянието между пътната настилка и най-ниската точка на превозното средство, варира в зависимост от марката и модела, както и от натоварването и техническото състояние на превозното средство.

- точното позициониране на превозното средство по време на движение (или в покой) не може да бъде гарантирано и предавателната и приемащата бобини обикновено не могат да бъдат разположени точно една над друга, което води до постоянно хоризонтално изместване. Това допълнително намалява коефициента на магнитна връзка между предавателната и приемната намотка този начин ефективността на цялата система.

За да се изследва въздействието на гореспоменатите проблеми, беше разработен лабораторен модел в мащаб 1:4 на безконтактна система за зареждане на електрически превозни средства. Взети са предвид изложените по-долу съображения:

Предавателната намотка на такава система не е обект на никакви ограничения по отношение на размера, тъй като е вградена в пътната настилка. Размерът на приемащата намотка обаче е ограничен от размерите на превозното средство, в което е инсталирана. Според проучването, оптималният диаметър на приемащата намотка е опреде-

лен на 600 мм, което позволява инсталирането ѝ във всяко електрическо превозно средство (проблем №1).

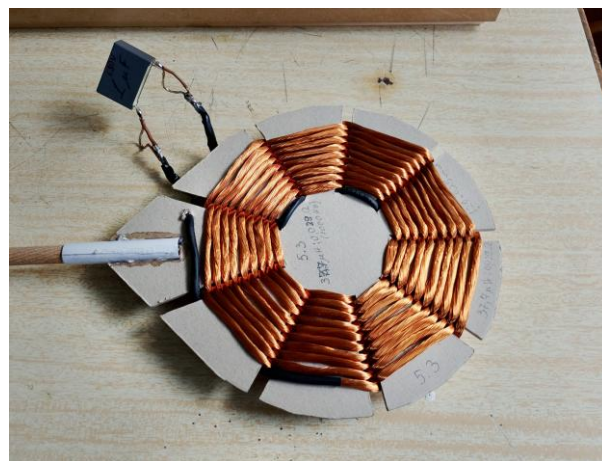
Разстоянието между предавателната и приемната намотка е по-голямо от пътния просвет на превозното средство, тъй като предаващата намотка трябва да бъде покрита с допълнителен защитен слой пътна настилка. Ако разстоянието между предаващата и приемащата бобини надвишава $1/4$ от диаметъра (D) на предаващата намотка, ефективността на безконтактната система за пренос на енергия (зареждане на електромобили) намалява значително под 80% - минималната ефективност за такива системи [4-8]. При диаметър на намотката 600 mm, разстоянието $D/4$ е 150 mm, което е колкото пътния просвет на почти всички разпространени електрически превозни средства. Като се вземе предвид дебелината на защитния слой над предаващата намотка, това разстояние се увеличава до 200 mm. (проблем № 2)

Възможно решение на този проблем е въвеждането на допълнителен резонансен кръг (последователно свързани намотка и кондензатор) под приемащата намотка, инсталирана в превозното средство. Чрез регулиране на вертикалното положение на тази резонансна верига може да се компенсира влиянието на различните пътни просвети на различните електрически превозни средства. Влиянието на хоризонталното изместване на предаващата и приемащата бобини една спрямо друга също може да се компенсира до голяма степен (проблем №3) [4-5].

За изследването е разработен прототип на безконтактна система за зареждане на електрически превозни средства, като са взети под внимание специфичните физически и електрически параметри на електрическите автомобили и безконтактната система за зареждане на електромобили.

2.1 ФИЗИЧЕСКИ ПАРАМЕТРИ НА РАЗРАБОТВАНИЯ МАКЕТ

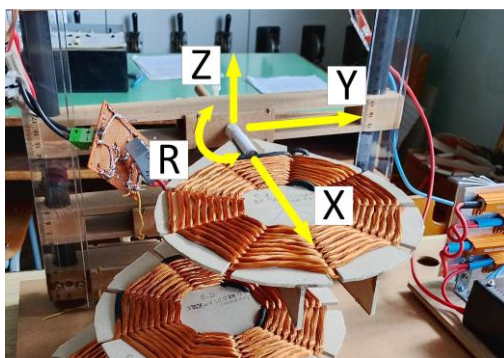
При разработването на макета е взет предвид диаметърът на приемната и предавателната намотка на зарядната станция (600 мм, както е дефинирано по-горе). В мащаб 1:4, приемащата намотка (RX) на макета е с диаметър 150 мм. Тя е направена от 20 навивки от многожичен проводник (120 нишки с диаметър 0,22 мм), напречното сечение на проводника е 4 мм², началото на навивката е на 30 мм от центъра на намотката, а крайт е на 75 мм от центъра на намотката. Индуктивността е 38,3 μ H. В зависимост от капацитета на кондензаторите, които се използват, работната честота може да варира от 25 до 30 kHz (Фиг. 1.).



Фиг. 1. Външен вид на бобините.

Предавателната намотка (TX) и допълнителния резонансен кръг (RC) на модела са произведени по същия начин.

За да се симулират различните позиции на електрическото превозно средство по време на процеса на зареждане, геометричното разположение на трите бобини (RX, TX и RC)- може да се променят (фиг. 2).



Фиг. 2. Възможност за геометрично раз местване на намотките на макета в пространството

Всяка намотка може да се премества в три различни посоки – вертикално (ос Z) и две хоризонтално (ос X, Y). Всяка намотка може да се върти поотделно по оста Z. Това осигурява четири степени на свобода за всяка намотка.

2.2 ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ПАРАМЕТРИ НА РАЗРАБОТЕНИЯ МАКЕТ

Определянето на електрическите параметри на безконтактен предавател на енергия с увеличено разстояние между предавателната и приемащата бобини е сложна задача, тъй като коефициентът на магнитно връзка (k) е много малък. Поради тази причина не могат да се прилагат Т-образни еквивалентни заместващи схеми.

В този случай е целесъобразно да се използват квадратни матрици със Z-параметри, като броя на редовете (съответно стълбове) е равен на броя на бобините на системата за безконтактен пренос на енергия.

За изчисляване на индуктивностите на бобините на разработвания прототип се използва следната квадратна матрица (Формула 1) [8].

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

където:

L - индуктивност на системата;

L_{11} - индуктивност на предаващата намотка;

L_{22} - индуктивност на резонансния кръг;

L_{33} - индуктивност на приемащата намотка;

$L_{12} = L_{21}$ - взаимна индуктивност между предаващата намотка и резонансния кръг;

$L_{13} = L_{31}$ - взаимна индуктивност между предаващата и приемащата бобини;

$L_{23} = L_{32}$ - взаимна индуктивност между резонансния кръг и приемащата намотка.

При изчисляване на ефективността на система с въведен N-брой резонансни кръгове се използва метод на изчисление, при който резонансните кръгове се разглеждат като филтри. Въз основа на тази теория ефективността на системата може да се изчисли с помощта на представената по-долу формула (Формула 2) [8]:

$$\eta_{\max} = \left(1 - \frac{r_n}{R_{\text{load}}}\right) \cdot \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n r_i - 1}{R_{\text{source}}}\right) \quad (2)$$

където:

$\eta_{\max}$ - максималната ефективност на системата;

r_n - съпротивление на последния резонансен кръг;

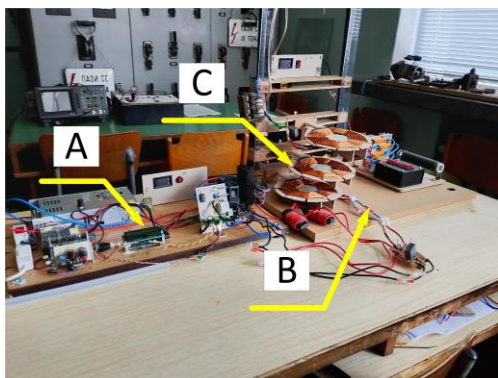
R_{load} - съпротивление на товара;

r_i - съпротивление на i-тия резонансен кръг;

R_{source} - съпротивление на източника.

2.3 ОСНОВНИ ЧАСТИ НА МАКЕТА

Разработеният лабораторен модел се състои от три части (Фиг. 3).



Фиг. 3. Външен вид на лабораторния макет:
А- първа част(предавателна), В- втора част
(приемна) и С- трета част (резонансен кръг).

Първата част съдържа захранващия блок, волтметър, амперметър, честотен генератор, честотомер и усилвателен блок

Втората част съдържа системата, която позволява геометрично разместване на бобините в хоризонтална и вертикална посока, както и въртене по оста Y. Тази част включва и токоизправител с Шотки диоди, комбиниран цифров волтметър и амперметър за измерване на изходното изправено напрежение и ток, както и товарните резистори. Чрез промяна на тяхното съпротивление може да се променя натоварването на безконтактния предавател и да се симулира степента на разряд на батерията.

Третата част се състои от резонансен кръг (RC), съдържащ намотка, аналогична на предавателната и приемащата бобини и паралелно свързан към нея кондензатор. Тя е разположена във въздушната междина между предавателната и приемащата бобини и за целите на безконтактния пренос на енергия трябва да е значително по-близо до приемащата намотка (за да може да бъде разположена в електрическото

превозно средство). В съответствие с дефинираната работна честота в точка 2.1 е изчислен резонансният кондензатор от 970 nF, свързан паралелно към нея.

ЕКСПЕРИМЕНТИ, НАПРАВЕНИ С МАКЕТА

Разстоянията между предавателната намотка (TX), резонансната намотка (RC) и приемащата намотка (RX) са нормализирани и изразени в проценти. Експериментите са проведени на три разстояния между предавателната и приемащата бобини: 100 mm, 120 mm и 140 mm. При избрания мащаб 1:4 на модела, 100 mm съответства на разстояние от 350 mm от електрическото превозно средство, а 140 mm - на разстояние от 500 mm. Таблица 1 показва нормализираното разстояние (TX - RX) между предавателната (TX) и приемащата бобини (RX), прието за 100%, и нормализираното разстояние (RX - RC) между резонансната верига (RC) и приемащата намотка (RX), вариращо от 25% до 75%. Идеята на дизайна е резонансната намотка да се постави заедно с приемащата намотка в превозното средство (Таблица 1).

Таблица 1: Нормализирани и действителни TX-RX и RX-RC разстояния в прототипа

TX-RX	RX-RC						
100%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%
100 mm	35 mm	40 mm	45 mm	50 mm	55 mm	60 mm	65 mm
120 mm	42 mm	48 mm	54 mm	60 mm	66 mm	72 mm	78 mm
140 mm	49 mm	56 mm	63 mm	70 mm	77 mm	84 mm	91 mm

Съгласно посочените в Таблица 1 разстояния са проведени четири серии от експерименти при четири различни товарни съпротивления- 2, 3, 4 и 5 ома.

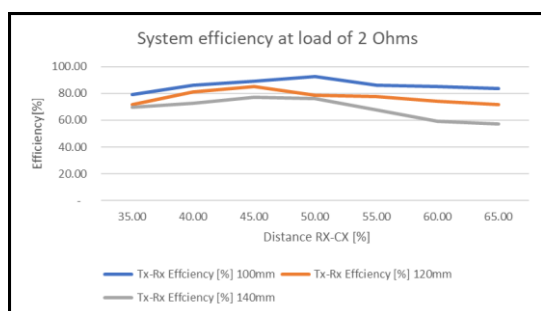
Различните съпротивления на натоварване съответстват на различни степени на разреждане на батерията на електрическото превозно средство. Ниските стойности на импеданса (напр. 2 ома) показват дъл-

боко разредена батерия, докато високите стойности на импеданса (напр. 5 ома) показват напълно заредена батерия. Резултатите от тези експерименти са обобщени на представените по-долу четири фигури (Фиг. 4 - 7).

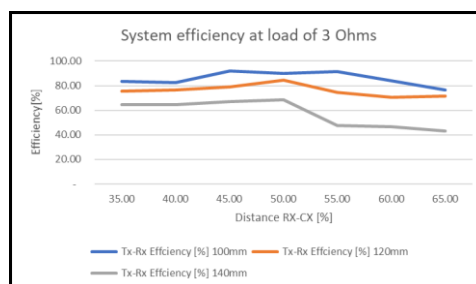
АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

Фигури от 4 до 7 показват резултатите от изследването на ефективността на макета за четирите съпротивления, използвани като товар – 2, 3, 4 и 5 ома. Измерванията са проведени при разстояние TX-RX от 100 мм (показано в синьо на диаграмите), разстояние TX-RX от 120 мм (показано в оранжево на диаграмите) и разстояние TX-RX от 140 мм (показано в сиво на диаграмите). Разстоянието RX-RC е използвано съгласуване със стойности от 35, 40, 45, 50, 55, 60 и 65% от разстоянието TX-RX.

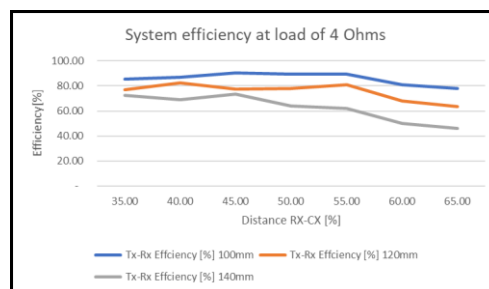
Когато разстоянието между предавателната и приемащата намотка се промени от 100 на 140 мм, максималната ефективност на системата варира между 92,83% (при разстояние 100 мм между TX и RX и съпротивление 2 ома) и 76,95% (при разстояние 140 мм между TX и RX и съпротивление 2 ома).



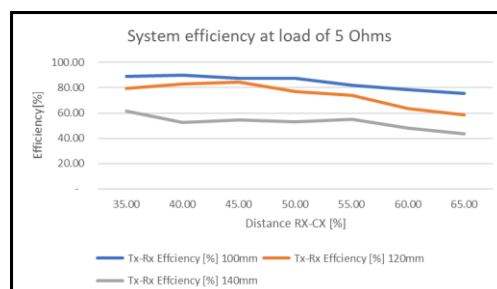
Фиг. 4 . Ефективност на системата при товарно съпротивление от 2 ома.



Фиг. 5. Ефективност на системата при товарно съпротивление от 3 ома.



Фиг. 6. Ефективност на системата при товарно съпротивление от 4 ома.



Фиг. 7. Ефективност на системата при товарно съпротивление от 5 ома.

При промяна на разстоянието между предавателната и приемната намотка от 100 до 140 мм максималната ефективност на системата варира между 92,83% (при разстояние от 100 мм между TX – RX и съпротивление 2 ома) и 76,95 % (при разстояние от 140 мм между TX – RX и съпротивление 2 ома) в зависимост от положението на допълнителния резонансен кръг.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Както се вижда от представените по-горе резултати от измерванията, чрез въвеждането на допълнителен резонансен кръг в системата за безконтактно зареждане на електрически автомобили става възможно значително да се увеличи разстоянието, на което може да се предава енергията, както и да се компенсира влиянието на товарното съпротивление върху ефективността на системата.

В бъдеще ще се продължи да се работи по възможностите за увеличаване на КПД на предложения модел на безконтактна система за зареждане на електромобили, като се наблегне на методите за управление на крайните усилвателни стъпала и системите за съгласуване.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bernstein L. et al., "Climate Change 2007: Synthesis Report", Intergovernmental Panel on Climate Change.2008, ISBN 92-9169-122-4.
- [2] <https://history.aip.org/climate/co2.htm>.
- [3] Keller D., Feng E. and Oeschles A., "Potential climate engineering effectiveness and side effects during a high carbon dioxide-emission scenario", Nature Communication, 2014, DOI: 10.1038/ncomms4304.
- [4] Madzhzrov N., Iliev D., "Wireless Power Transfer System with Four Degrees of Freedom", ICEST 2022, 16-18.06.2022; Ohrid, N. Makedonia; DOI:10.1109/IEST55168.2022.9828574
- [5] Iliev D., Madzharov N. and Ilarionov R., "Methods to Increase Distance in Wireless Power Transfer Systems", ICEST 2021, 16-18. 06. 2021; Sozopol, Bulgaria; ICEST 2021 – Proceedings 9483566, pp.95-98. DOI: 10.1109/ICEST52640.2021.9483566.
- [6] Kurs A., Moffatt R., Joannopoulos J.D. and Karalis A., "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances" in Science, Vol. 317, 6 July 2007. DOI:10.1126/science.1143254M
- [7] Budhia M., Covic G and Boys J. "A New IPT Magnetic Coupler for Electric Vehicle Charging Systems"; IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 7-10 Nov. 2010. DOI:10.1109/IECON.2010.567530.
- [8] Imura T., "Wireless Power Transfer Using Magnetic and Electric Resonance Coupling Techniques", Springer, 2020, ISBN 978-981-15-4579-5.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ИЗГРАЖДАНЕ НА СИСТЕМА ЗА СЪБИРАНЕ И АНАЛИЗ НА ДАННИ В РЕАЛНО ВРЕМЕ

BUILDING A SYSTEM FOR COLLECTING AND ANALYZING DATA IN REAL

Petya Pavlova

p_pavlova@tu-plovdiv.bg

Boryana Pachedjieva

pachedjieva@tu-plovdiv.bg

Ivailo Atanasov

ivo_atan@tu-plovdiv.bg,

Dobrinka Petrova

dpetrova@tu-plovdiv.bg

Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract

Atmospheric phenomena and related objects are easily recognizable to humans, but they are still difficult to identify by technical means. For computer systems, reproducing the same visibility requires appropriate training. Therefore, any training should have some reference objects through which a processing that improves visibility can be applied. Such objects with appropriate characteristics are usually part of test databases.

Keywords: database, image processing, meteorological objects, video-sequences processing

ВЪВЕДЕНИЕ

С развитието на компютърната техника, технологиите използващи компютърно зрение все повече навлизат в сложните автоматизирани системи. За една система, работеща при външни атмосферни и урбанистични условия, е нужно да се използват методи, които успешно създават добра видимост на обектите и коректност на тяхната идентификация. Важен етап в обработката е откриването на конкретния вид смущаващ фактор. Основните събития, които пречат на добрата видимост (установени от нас до момента) са: наличие на мъгла, смог, снеговалеж, дъжд, градушка, попадане на ярко светещ обект в зрителното поле на камерата (например слънцето или улична лампа или фарове на

автомобил), наблюдение при силно отражение. За основните атмосферни явления има разработени критерии и статистически модели, които са изведени от ограничен брой подходящи изображения [1] някои извлечени от специално създадени бази данни [2,3]. За проследяване на заслепяването при насрещен светлинен източник или силно отражение няма предложени решения. Разработките за филтриране на изображения при загуба на видимост поради мъгла, дъжд и сняг използват систематично наблюдение на обекти и фиксиране на стойности на избрани параметри при добра видимост. Анализ и обобщаване на използваните критерии за възпроизвеждане на числен критерии показват, че в основата на всички оценители влияят средна стойност на яркостта в пикселите



и неговата девиация. Техниките за откриване на типа на смущаващия фактор и коригиране на изображенията използват: създаване на монохромно изображение от наличното бяло за всеки пиксел в изображение, наречено Dark Channel Prior (DCP) [4-6]; набор от еталонни пробни образци с размер на снежинки и дъждовни капки за откриване и отстраняване на снеговалеж и дъжд [1,6]; многостепенна обработка и анализ чрез невронни мрежи ползващи много проби за точно определяне на вида на конкретното явление [2,3]. Изчислителните алгоритми оценяват обща промяна [3], плътност на мъглата [4], загуба на видимост на контурите на обектите [7,8], промените в малки области от цялата картина [6]. Използваните методи се разделят на такива, които правят филтрация и подобряване на видимостта на базата на предварително известен вид на изображението и такива, които ползват едно изображение, но привеждат формата на хистограмата към предварително зададен тип разпределение [9]. Постигането на ефективна корекция неминуемо изисква обработката на големи обеми данни. Използваните в момента методи с невронни мрежи [5] дават добра база за идентификация на метеорологични условията, но работят с ограничени извадки дават възможност за грешка при възникване на непозната комбинация от условия. От гледна точка на постигането на автоматизиран процес в задачата за подобряване на видимостта един от основните проблеми при избора на филтрация е възможността за бърза смяна на атмосферните условия. Гъстотата на мъглата зависи от скоростта на вятъра. Наличието на индустриално запрашване или замърсяване на въздуха провокира възникването на смог. Газовете, отделени от изгарянето на изкопаеми горива, съдържат предимно азотен оксид (NO), въглероден оксид (CO), въглероден диоксид (CO₂) и летливи органични съединения (ЛОС). Парите на органичните

вещества могат да се кондензират в малки течни капчици, които се разпространяват във въздуха под формата на аерозоли, които разпръскват слънчевата светлина, намалявайки видимостта. Под въздействие на слънчевата светлина, те влизат във фотохимични реакции и произвеждат продукти, наречени вторични замърсители, които дават оцветяване на мъглата различно от сиво. Азотният диоксид (NO₂) и озонът (O₃) например имат най-силно влияние върху образуването на жълто-кафеникав смог [10]. Комбинирането на степента на замърсяване с критериите за намаляване на видимостта в регистрирани изображения би създало възможност за увеличаване на скоростта и точността на реакцията за филтрация.

Отчитане на бързите изменения на атмосферните условия предполага обработка на непрекъснат видео поток. Задачата е актуална както за системите, следящи пътен трафик, така и за автомобили оборудвани с автотопилот, както и за дронове, прелитащи и имащи нужда от ориентация в непозната среда. С оглед на това следва още един проблем, засягащ необходимите изчислителни ресурси. Наличните конвенционални процесори работят вече основно с 64 битова дума. Разработените стари алгоритмите, са ориентирани основно към 32 битова обработка. Работата им на 64 битови процесори добавя допълнително забавяне. Паралелните процесори и алгоритми позволяват увеличаване на скоростта, но поставянето на паралелна процесорна система на движещ се обект предопределя увеличаване на неговата товароносимост и необходимо налично достатъчно захранване. Решаване на проблема се търси в облачните връзки и изчисления, за които обаче е необходима стабилна интернет връзка. При изпълнение на задачи, например свързани с претърсване на трудно достъпни географски обекти, този план определено не може да бъде лесно осъществен. Очевидно, реално-временната работа на ав-



томатизирана система изисква разработване на специфични бързи методи и техники за получаване на търсения резултат.

Целта на настоящия проект е да се създаде система, която да натрупва информация и обучава автомат за включване на обработката на изображения и скоростна прекалибровка на камера съобразно промените в околните условия.

Задачи и хипотези

Предварителната работа за изпълнение на крайната цел изисква провеждане на изследвания на възможностите за обединяване на информация от разнотипни датчици за разработване на критерии и алгоритми за подобряване на видимостта в изображения в реално време.

Първата задача е установяване на промените на фиксирани параметри в изображенията при всички видове атмосферни и урбанистични фактори.

Основните хипотези при решаването на тази задача предполагат, че:

- * промените във видимостта в заснети изображения има постепенен характер и може да бъде предвидена и проследена във видео-поток;

- * наличието на данни от допълнителни датчици за замърсяване на въздуха, влажност и вятър могат да допринесат за прогнозиране на възможна загуба на видимост.

Втората задача е свързана с изследване на различни видове алгоритми за подобряване на видимостта в изображенията, с цел постигане на оптимална бързина в обработката.

Използваните до сега методи за филтрация разчитат на обработка на вече регистрирани изображения. Ако обаче е възможно да се създаде метод, наподобяващ реакцията на

човешкото око при промяна на външните условия на наблюдение – с разделена корекция на усилването в различните канали и по дължина на вълната, би могло да се постигне по-добра видимост още на ниво регистрация с ускоряване на получаването на резултат.

Предполага се, че една система може да функционира адекватно на промените, ако обучението ѝ следва обучението на човешките индивиди, а именно – получаване на начални понятия и граници; разширяване на понятията – съпътствано от разширяване на възприятията и промяна на ограниченията.

Третата задача е провеждане на изследвания за намиране на оптимален софтуер и хардуерна конфигурация, които биха позволили заснемане и обработка на данните идващи от дрон.

Съществува повече от една възможност за събиране и обработка на данни в такава ситуация:

- * обработка в реално време и направа на корекция със система, поставена на дрон,

- * предаване на данни по безжичен канал, обработка на външен компютър и връщане на необходимите корекции към камерата на дрон;

- * предаване на данни по безжичен канал, обработка на външен компютър и постигане на необходимите корекции в наблюдаваните изображения в реално време.

Предполага се, че при наличие на необходимата комбинация от устройства е възможно да се проведат необходимите изследвания.

Методи и изследователски техники

За установяване на промените на фиксирани параметри в изображенията при всички видове атмосферни и урбанистични фактори се предполага да бъдат събрани и обработе-

ни статистически данни, като регистрацията е съпътствана с регистрация на замърсявания на въздуха, температура, влажност и наличие на вятър. Могат да бъдат използвани данни от IP камера, монтирана в близост до наличната в момента стационарна метеоплощадка, както и данни от камера и датчици монтирани на дрон.

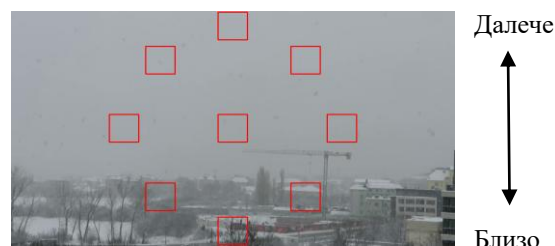
За изследване на различни алгоритми за подобряване на видимост има вече натрупана информация, която може да се организира в база данни с карта на съответствия. Тази карта трябва да се опреснява според новите находки. Изследователската част тук е да бъде намерена технология за въвеждане на информация в реални условия с безкраен цикъл на усъвършенстване. В допълнение към това, тестване на техники за динамична пре-калибровка на камерата, според промяна на външните условия би дало информация за възможните техники за подобряване на видимост.

Разработваната методика за третата задача предполага обработка на данни от различни области в едно изображение и проследяване на промените в тях във видео-последователности съпроводени с тестове на алгоритми и компютърни конфигурации, постигащи оптимални време на изпълнение и точност на резултатите. Критериите за оптималност се определят от възможностите за корекция в реално време за постигане по-добра видимост.

Предходни изследвания

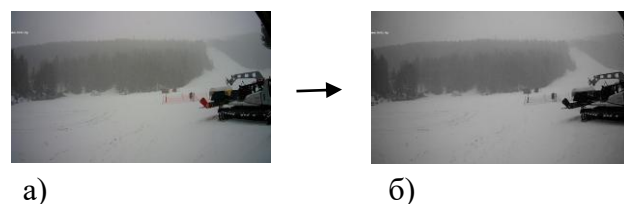
В началните изследвания от серии видео данни за следене на метеорологични условия е направен анализ на различните методи за филтрация и подобряване на видимостта [11,12]. Така стигнахме до три основни параметъра, които влизат във всички използвани методики: средна стойност, девиация и цветова температура [11]. Предложихме динамично проследяване на появата на за-

губа на видимост при сравняване на параметри от различни полета в едно изображение. В нашата работа използваме алгоритъм, който разчита на различно разстояние на обектите в зрителното поле на камерата (всяка област обхваща обекти на различно разстояние) - фигура 1.



Фиг.1 Зони на отчитане на параметри

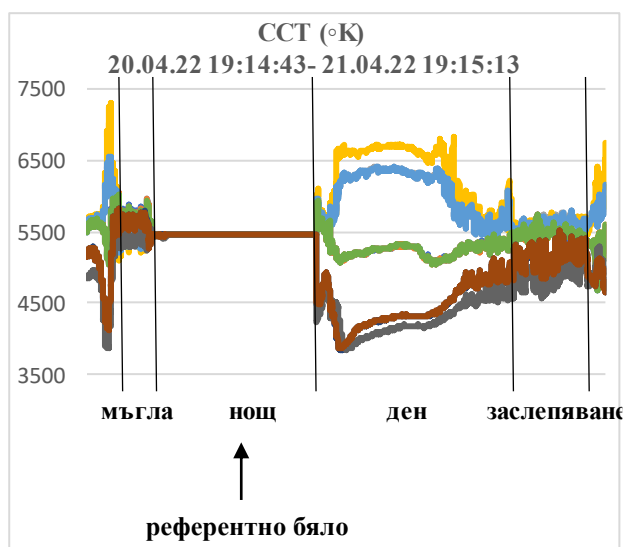
Обработката се извършва върху кадри, трансформирани в DCP изображения – фигура 2.



Фиг.2 Начално изображение – а, DCP изображение – б.

Проследяват се параметри за средна стойност, отклонение и корелирана цветна температура (CCT) за всяко локално поле и относителна разлика към едно от тях. Установени са промените по критерии за поява на загуба на видимост за конкретна област:

- Намаляване на отклонението на интензитета;
- Корелирана цветова температура, близка до референтната стойност на бялото (демонстрирано на фигура 3);



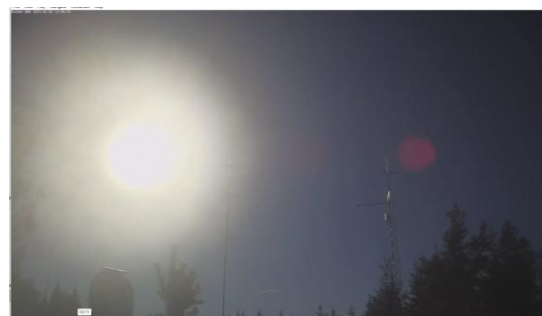
Фиг. 3 Изменение на CCT в различните
локални полета

- Увеличаване на разликите в отклонението и CCT спрямо същите параметри на избрана област.

Направеният анализ на видео последователностите изведе варианти, при които в проследяваните стойности възниква лъжливо показание за наличие на промяна. Основно това са: заслепяването на камерата поради навлизане на светлинен източник в зрителното поле и промени в цветовете, резултат от изгрев или залез на слънцето [12] – фигура 4.



а)



б)



в)

Фиг.4 Разлика в цветовете -а,в и загуба на видимост -б

Разработен е алгоритъм за калибровка на камера без необходимост от допълнителни измервания [13]. Алгоритъмът разчита на задаване на калибровъчни стойности чрез модификация на спектрите за референтно бяло.

Разработен е алгоритъм тестващ възможностите за постигане на по-високо използване на системата, поради пропуснати времеви кванти за някои работни места. Използваният алгоритъм за планиране на RFair е модифициран, за да се включи параметър, отразяващ "спешността" на заданието по отношение на неговото (m,k)-рамково ограничение [14].

Всички изследвания са придружени от специално създадени програмни модули.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Създадена е база данни от видео наблюдение на околната среда и атмосферните обекти, които са обвързани с конкретни стойности на параметри в заснетите кадри при различни регистриращи устройства[15].

Заснети са видео последователности с различни метеорологични обекти при използване на седем различни устройства; използвана е една камера за заснемане на данни за промените в яркостта, наситеността на цвета и цветовата температурата за цялата светла част на деня. Проследяваните параметри са осреднени върху 100 последователни кадъра, като са изведени средна, минимална и максимална стойност.

Получени са сравнителни резултати от извличане на стойности на разширен брой параметри от видео последователности, класифицирани по типа на някои метеорологични обекти. Заключениета от получените резултати могат да се обобщят:

Относителните параметри – девиация, наситеност и цветова температура за обект и цветова температура за осветяващо лъчение могат да послужат за предварително разделяне на кадрите по обекти; съставяне на зависимост между подходящи параметри може да осигури възможност за възпроизвеждане на прогнозни стойности; комбинирание на стойности на параметри би позволило уточняване на класификация на явленията.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

- [1] M. Roser and A. Geiger, "Video-based raindrop detection for improved image registration," IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops, ICCV Workshops, 2009, pp. 570-577, doi: 10.1109/ICCVW.2009.5457650.
- [2] M. Roser and F. Moosmann, "Classification of weather situations on single color images", IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2008, pp. 798-803, doi: 10.1109/IVS.2008.4621205.
- [3] J. Yan, J. Li, X. Fu, "No-reference quality assessment of contrast-distorted images using contrast enhancement", arXiv preprint arXiv:1904.08879, 2019.
- [4] R.Castelli, P.Frolkovic, C.Reinhardt, C. C Stolk, J. Tomczyk, & A. Vromans. "Fog detection from camera images". In E.Cator, & R. J. Kang (Eds.), Proceedings of the 114th European Study Group Mathematics with Industry: SWI 6, 2016, pp.25-43
- [5] K. Gu, D. Tao, J.F. Qiao, and W. Lin, "Learning a no-reference quality assessment model of enhanced images with big data". IEEE transactions on neural networks and learning systems, 29(4), 2017, pp.1301-1313.
- [6] H. Archana, M. Priya, A. Muthukumaravel, "Rain or Snow Removing in a Single Color Image - A Novel Algorithm", International Journal of Pure and Applied Mathematics 118 (20), 2018, pp.923-933.
- [7] T. Mingming, F. Tao, F. Yingle, W. Wei, S. Qingshan, and G. Haitao, "Image-Dehazing Method Based on the Fusion Coding of Contours and Colors", doi: 10.1109/ACCESS.2019.2945108, IEEE Access, 2019
- [8] V. Domonkos, "No-Reference Image Quality Assessment with Global Statistical Features", Journal of Imaging vol.7(2):29, February, 2021, DOI: 10.3390/jimaging7020029
- [9] P. Mohammadi, A. Ebrahimi-Moghadam and S. Shirani. "Subjective and Objective Quality Assessment of Image: A Survey", Majlesi Journal of Electrical Engineering, vol. 9, No. 1, 2014, pp 55-83.
- [10] Roger Morrison, Фотохимичен смог: характеристики, причини и ефекти



- <https://bg.warbletoncouncil.org/smog-fotoquimico-9721>
- [11] P. Pavlova, B. Pachedjieva, “Investigation on the possibilities of tracking dynamic visibility changes in images“, Proc. XXX International Scientific Conference Electronics - ET2021, DOI:10.1109/ET52713.2021.9579821
- [12] P. Pavlova, B. Pachedjieva. “ Study of Limiting Factors in the Selection of a Learning Sample of Images for Automatic Tracking of Changes in Weather Conditions“, Proc. XXXI International Scientific Conference Electronics - ET2022, DOI:10.1109/ET52713.2021.9579821
- [13] P. Pavlova, “Applied methodology for dynamic estimation of visibility parameters: colors“, Proc. X National Conference with International Participation "Electronica 2019", May 16 - 17, 2019,
- [14] I. Atanasov. “Proportionate (m,k)-firm Scheduling for Multiprocessor Systems“, BCT'19, September 26–28, 2019, Sofia, Bulgaria, ACM ISBN: 978-1-4503-7193-3
- [15] B. Pachedjieva, I. Atanasov, D. Petrova, P. Pavlova. Comparative analysis of numerical data from meteorological objects in video sequences. Proc. XXXIV International Scientific Conference Electronics - ET2025 (in press).



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

РЕАЛНО-ВРЕМЕННА СИСТЕМА ЗА ИЗВЛИЧАНЕ И ОЦЕНКА НА ПАРАМЕТРИ ОТ ВИДЕО ФАЙЛОВЕ С ПРИРОДНИ ОБЕКТИ И ЯВЛЕНИЯ

A REAL-TIME SYSTEM FOR EXTRACTION AND ESTIMATION THE PARAMETERS OF NATURAL PHENOMENA IN VIDEO FILES

Petya Pavlova

p_pavlova@tu-plovdiv.bg

Ivaylo Atanasov

ivo_atan@tu-plovdiv.bg

Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Boryana Pachedjieva

pachedjieva@tu-plovdiv.bg

Dobrinka Petrova

dpetrova@tu-plovdiv.bg

Abstract

The correct identification of natural phenomena – sunny, cloudy, rain, mist and related objects are easily recognizable to humans, but they are still difficult to identify by technical means. The major challenge is formalization and categorization of the phenomena in technical, i.e. computer terms. For computer systems, reproducing the same visibility requires appropriate training and large amount of data. Therefore, any training should have some reference objects through which a processing that improves visibility can be applied. Such objects with appropriate characteristics are usually part of test databases.

Keywords: database, image processing, meteorological objects, video-sequences processing

ВЪВЕДЕНИЕ

Създаването на система за работа в реално време, която да натрупва информация и обучава автомат за включване на обработката на изображения и скоростна пре-калибровка на камера съобразно промените в околните условия само по себе си е сложен процес изискващ решаване на множество подзадачи. Когато става въпрос за интелигентни транспортни средства, функциониращи в открити про-странства проблемите идват от различни посоки. На първо място атмосферните явления и свързаните с тях обекти са лесно разпознаваеми за хората, но

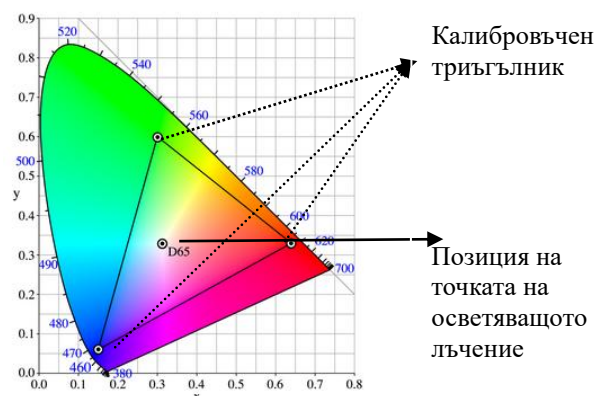
не и за техническите средства. Видимите характеристики на всеки обект го определят в дъжд, мъгла, сняг и т.н., но за компютърна идентификация информацията за тях трябва да бъде сведена до числа, отговарящи на измеряеми величини. Проблем представляват и различните камери за регистрация на изображения и видео. Въпреки, че съществува стандарт за калибровка [1], който би следвало да осигурява еднаквост на регистрираните характеристики, различните сензори и режими на работа не дават нужната еднаквост. Проблемът се усложнява от различната видимост при които се появява един и същ обект. В добавка, съвременната автоматиза-

ция на транспортните средства изисква кратко време за идентификация на явление-то.

От гледна точка на средствата за регистрация, всеки обект има граници, форма, размери, яркост и оцветяване, които се пренасят в заснеманите кадри. Измеряемите величини в изображенията, чрез които могат да се установят тези характеристики и техните промени включват две основни величини:

Контраст – определя видимостта на контурите на обекта. Чрез контурите се достига до стойности на геометрични параметри, с които обектите могат да се бъдат подложени на идентификация. Най-често използвания начин за пресмятане е осредняване на градациите, и определяне на дисперсията им [2,3,4]. Трябва да се отбележи и зависимостта на получаваните стойности за размери от растер, зрително поле и разстояние до обектите.

Оцветяване – определя всеки обект и фона и се влияе от промените в регистрацията дори, когато няма загуба на видимост на контурите. Всяка смяна на осветлението води до смяна на стойностите за оцветяването. Съществуват множество системи за представяне на цветовете извън използваната за съхранение и пренос RGB. Тази, която дава възможност бързо да се обединят калибровъчните характеристики на регистратора, осветяващото лъчение и измерване чрез друг способ на регистрация е базовата система CIE.XYZ [5]. Цветността тук, може да бъде представена чрез двойка координати в диаграмата на Локуса, но и чрез корелирана цвetoва температура -CCT, с която е прието да се характеризира цвета на осветяващото лъчение (фигура 1).



Фиг. 1 Диаграма на цветност за CIE.XYZ

Най-често CCT се определя чрез спектрални данни за лъчението на осветяващия източник. В цифрови изображения обаче, нейното пресмятане изисква използване на количеството бяло във всеки регистриран пиксел. За целта се създава помощно изображение наречено DSPI (dark channel prior image) [6].

От гледна точка на средствата за обработка на информацията, наличните технически възможности са разнообразни. Техният избор се определя от нуждата да бъде направена идентификацията. Подобна система може да е полезна при следене на пътния трафик, системите с автопилот – автомобили, дронове, които трябва да могат бързо и правилно да се ориентират в среда с променящи се метеорологични условия.

Съществува повече от една възможност за събиране и обработка на данни в такава ситуация:

- обработка в реално време и направа на корекция със система, поставена на автопилотната система (автомобил, дрон и др.),
- предаване на данни по безжичен канал, обработка на външен компютър и връщане на необходимите корекции към камерата на автопилотната система



- предаване на данни по безжичен канал, обработка на външен компютър и постигане на необходимите корекции в наблюдаваните изображения в реално време.

Цел и етапи на реализация

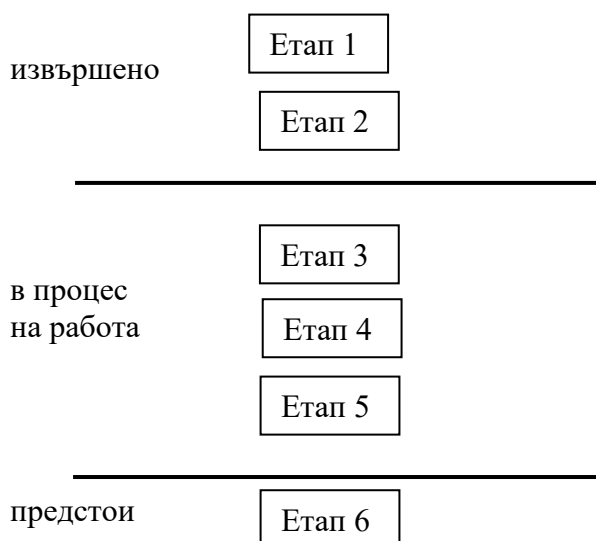
Крайната цел на работата е създаване на автоматизирана система за работа в реално време, която натрупва информация и обучава автомат за включване на обработката на изображения и пре-калибровка на камера, съобразно промените в околните условия.

Основният проблем при разработване на такава система за момента са:

- липсата на обемна база видео-данни, чрез която да се извлекат критерии за настъпване на събитията следващи скоростта на възникването им
- бързи и надеждни методи за получаване на резултат – работа на системата в реално време

Етапи на реализация

На фигура 2 е илюстрирано извършеното и предстоящото като цели и задачи.



Фиг.2. Етапи на реализацията

Където:

Етап 1 - Заснемане на видеопоследователности, съдържащи различни метеорологични явления.

Етап 2 - Запис на видеопоследователностите в база данни, групирани по явление.

Етап 3 - Обработка на видеопоследователностите от базата данни. Анализ на стойностите на избрани за проследяване параметри.

Етап 4 - Установяване на зависимости (карта на съответствия) между метеорологично явление и стойности на следени параметри.

Етап 5 - Изследване на различни видове алгоритми за подобряване на видимостта в изображенията, с цел постигане на оптимална бързина в обработката.

Етап 6 – обработка в реално време - търсене по стойности на група от параметри за подреждане на данните.

Характеристики на Етап 1

В таблица 1 са показани техническите характеристики на хардуера, с който е осъществено видеозаснемането.

Таблица 1. Използвани устройства

Device	Sensor technology - camera	Patch size in pixels
GSM Samsung A51	CMOS - IMX586 – digital image stabilization- EIS	128 x 128
GSM Samsung A53	CMOS – GC2053 GSP, optical stabilization OIS	128 x 128
GSM Samsung A71	CMOS -S5KGW1 – ISOCELL, digital image stabilization- EIS	128 x 128
GSM iPad A15	CMOS - Sony IMX703- Sensor-shift optical image stabilization, night mode	128 x 128
SONY DCS W530	CCD - optical image stabilization	32 x 32
Canon SX270 HS	CMOS - back-side illumination -BSI	128 x 128
Navitel R250	CMOS - C2399, night vision mode	128 x 128

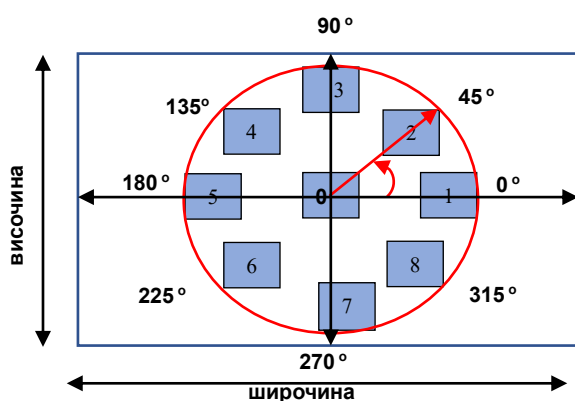
Характеристики на Етап 2

Видеопоследователностите са записани на външен носител, като са групирани по следните явления, които отразяват: ясно небе, облаци, мъгла, снеговалеж.

Характеристики на Етап 3

Следващия етап е снемане на параметри на видеото във вид, удобен за анализ. Това става с помощта на специализиран софтуер. Про-грамата е предназначена за извличане на стойности на параметри във видео файлове. Използват се 9 полета (пачове, patches), от които се заснема сигнал за средна стойност, девиация и цвeтова температура. Програмата слeди относителните изменения спрямо поле 8.

Разположението на полетата в кадъра е показано на фигура 3. Във всяко поле се пре-смятат параметри за трите цветообразуващи и данни от DCP канала. Резултатът е текстов файл с параметри, подредени като колони, както е описано в таблица 2.



Фиг. 3. Разположение и номерация на полетата.

Таблица 2. Структура на текстовия файл.

Video file name		Име на видео файла
Frame N		Номер на кадъра
Average R		Средна стойност за червено
Average G		Средна стойност за зелено
Average B		Средна стойност за синьо
Average DCP		Средна стойност за минимална компонента
Deviation R		Девиация за червено
Deviation G		Девиация за зелено
Deviation B		Девиация за синьо
Deviation DCP		Девиация за минимална компонента
intensity		Интензивност = 1/3 от сумата на средните R,G и B за единичен пач
saturation		Наситеност за единичен пач
За обект и осветление	CCT.x	х-координати на цвeтовата температура в цвeтовия Локус
	CCT.y	у-координати на цвeтовата температура в цвeтовия Локус
	CCT	Цвeтова температура в градус Келвин
dAv		Отклонение на средна стойност за минимална компонента спрямо пач номер 8
dDev		Отклонение на девиация за DCP компонента спрямо пач номер 8
dTc		Отклонение на цвeтова температура за осветлението спрямо пач номер 8
patchN		Номер на пач в кадъра

Характеристики на Етап 4

В [6] са изложени установените зависимости между някои метеорологични явления и параметрите от полетата в съответните кадри, съдържащи явлението. Направен е сравнителен анализ между параметрите за „ясно небе“, „сняг“, „мъгла“ и „дъжд“. Например за явлението „ясно небе“ е установено, че:

$$\begin{aligned} DCP_{dev} &< 10 \\ CCT.x &\in [0.25, 0.34] \\ CCT.y &\in [0.25, 0.34] \\ CCT &> 5000 \text{ K} \end{aligned}$$



Предстои изследване на цветовата температура (CCT) и анализ на стойностите ѝ, за да се определи:

- съществуват ли цветове (светлинни потоци), за които температурата е извън диапазона от валидни стойности.
- каква е разделителната ѝ способност – колко и кои цветови комбинации възпроизвеждат една и съща стойност за CCT.
- какви обекти могат да бъдат регистрирани чрез този параметър.

Характеристики на Етап 5

Алгоритмите за подобряване на видимост понастоящем използват корекции чрез изравняване на хистограмата [2,3], адаптивно изравняване на хистограмата [3], лимитирано по контраст адаптивно изравняване на хистограмата [4] и хроматична адаптация за промяна в цветовете [1]. Общите базови параметри “Средно аритметична стойност за изобразението”, “Средна осветеност” (averaged), “Стандартно отклонение” (std_dev), “Ентропия” (entropy), чрез които се правят корекциите, включват пресмятания на:

- средна стойност на цветообразуващи RGB;
- девиация в яркостта на всяка компонента;
- оцветяване.

Създаването на подходящ софтуер за работа върху събраните видео последователности е в процес на разработка.

Характеристики на Етап 6

В резултат на изследванията от предишния етап следва да е налична система за обработка в реално време на постъпващата видео информация (кадри) и на база на установените зависимости между явление и ха-

рактеризиращи го параметри да може да се установи за даден кадър какво явление представя. Необходимо е да се разработят бързи и ефективни алгоритми, тъй като работата им най-вероятно ще е в процесорна конфигурация, не притежаваща голяма изчислителна мощ (например дренова конфигурация). Както бе споменато по-горе, съществуват няколко възможности за събиране и обработка на данни в такава ситуация. Всичко това трябва да води до възможност за обработка, която да внася минимално забавяне, за да може реакцията на автопилотната система да е достатъчно бърза. Предстои изследване коя от тези възможности постига максимален ефект.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Постигнатото до момента е в съответствие с разработения график на проекта. В повечето от етапите е предвидено включване на докторанти и студенти, които да получат по-разширено и по-специализирано обучение по проблемите на проекта.

Резултати от проведените изследвания са публикувани в материали [7] и [8].

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност,, "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ISO 15076-1:2010, Image technology colour management. Architecture, profile format and data structure — Part 1: Based on ICC.1:2010



- [2] Gonzalez, R. and R. Woods, Digital Image Processing, 3rd Edition, Prentice Hall, 2007.
- [3] Mustafa, W. and M. Abdul Kadir, “A review of histogram equalization techniques in image enhancement application”, In: Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2018. p. 012026.
- [4] Pizer, S. M., R. E. Johnston, J. P. Ericksen, B. C. Yankaskas and K. E. Muller, "Contrast-limited adaptive histogram equalization: speed and effectiveness," [1990] Proceedings of the First Conference on Visualization in Biomedical Computing, Atlanta, GA, USA, 1990, pp. 337-345, doi: 10.1109/VBC.1990.109340.
- [5] Colorimetry, 3rd edition CIE 015:2004.
- [6] R.Castelli, P.Frolkovic, C.Reinhardt, C. C Stolk, J. Tomczyk, & A. Vromans. “Fog detection from camera images“. In E.Cator, & R. J. Kang (Eds.), Proceedings of the 114th European Study Group Mathematics with Industry: SWI 6, 2016, pp.25-43.
- [7] Pachedjieva, B., I. Atanasov, D. Petrova and P. Pavlova, Comparative analysis of numerical data from meteorological objects in video sequences, Proc. XXXIV International Scientific Conference Electronics - ET2025 (in press).
- [8] Pavlova, P. and B. Pachedjieva, “Methodology for numerical assessments of the quality of cloud fields images used in time mutability method”, In: 2020 XXIX International Scientific Conference Electronics (ET). IEEE, 2020. p. 1-5.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ПРОЕКТИРАНЕ НА ИНТЕРАКТИВНИ ТЕХНОЛОГИИ ОСНОВАНИ НА КОГНИТИВНИ ПРИНЦИПИ

DESIGN OF INTERACTIVE TECHNOLOGIES BASED ON COGNITIVE PRINCIPLES

Maya Dimitrova

Institute of Robotics, Bulgarian Academy of Sciences

Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Tanio Tanev

*Institute of Robotics,
Bulgarian Academy of Sciences*

Ivan Chavdarov

*Institute of Robotics,
Bulgarian Academy of Sciences*

Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract

The paper presents new interactive human-robot technologies designed within the Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies" by the Laboratory Robotics and Mechatronics at the Institute of Robotics, Bulgarian Academy of Sciences. The novelty is in the cognitive principles, implemented within the concept and the realisation of the described technologies. Principle one is "neuro-realistic implementation" of mechatronic mechanisms of system performance. Principle two is "eye-gaze control of external devices" and personal feedback on the subjective experience. Some ideas for future development and applications of the proposed technologies are discussed.

Keywords: interactive technology, social robot, cognitive principles, eye-gaze control.

INTRODUCTION

Recent advances of interactive technologies have led to improved interface adaptation to the cognitive needs of the users of various robotic systems – speed, presentation mode, colour, accessibility aspects, etc. [1, 2]. Two novel principles are being introduced in the present paper, which contributed to the success of the interactive human-robot interfaces designed by the team of the Mechatronics and Robotics Lab of the CCMEEST. Principle one is "neuro-realistic

implementation" of mechatronic mechanisms of robot performance via a brain tracking technology presented in section 1. The main outcome is a system, capable of transferring the motion and expression of the human head into commands for an emotion-expressive humanoid robot [3, 4]. Section 2 presents control algorithms to optimize the walking cycle of an innovative walking robot called "BigFoot" [5, 6]. Section 3 presents principle two - "eye-gaze control of external devices" such as BigFoot walking robot by a child in

the frame of a cognitive game and the obtained feedback from the game [7].

The main hypotheses of the presented in the paper research are formulated as optimisation of the proposed designs of mechatronic systems to achieve better cognitive performance and, as a result, better technology acceptance by the user. Hypothesis 1 for the ability of the proposed novel kinematic mechanism of robot head movement to *imitate* the emotional performance of a human actor was tested in Section 1. Hypothesis 2 about the new optimisation mechanisms of BigFoot robot to improve the speed and precision of its movement and rotation is described in Section 2. Hypothesis 3 tested the acceptance of the eye-gaze based method for robot control by children with learning difficulties. The outcome of the test as somewhat unexpected, but useful for future designs, is presented in Section 3. The conclusion section outlines the future research on design of novel robotic and mechatronic devices in interactive technologies based on cognitive principles.

1. TRANSFERRING THE MOTION AND EXPRESSION OF THE HUMAN HEAD TO AN EMOTION-EXPRESSIVE ROBOT

The actor's talent from an educational theatre is employed in an interactive technology in order to enhance the emotional skills of a child [4]. Emotions could be expressed by verbal messages, intonation, body postures, or facial expression by a human or a robot. Emotional child-robot interaction helps to catch quickly a child's attention and enhance information perception during learning and verbalization in children with communication difficulties.

EMOTIV EPOC EEG brain tracking device [8] is used for motion tracking and expression decipher. A magnetic and inertial measurement unit, which is embedded in

EMOTIV EPOC EEG brain tracking device, is utilized for head motion tracking. Then, movements and expressions are transferred to an emotionally-expressive robot EmoSan [3] in order to augment the robot with natural and expressive movements [4]. For this purpose, the combined techniques from motion capture and brain-inspired control are used. The actor head movements are tracked. The actor played sequences of head and face postures for six emotions: fear, joy, surprise, sadness, disgust and anger. Three main facial expressions transferred to the robot are happy, neutral and sad (Fig. 1).

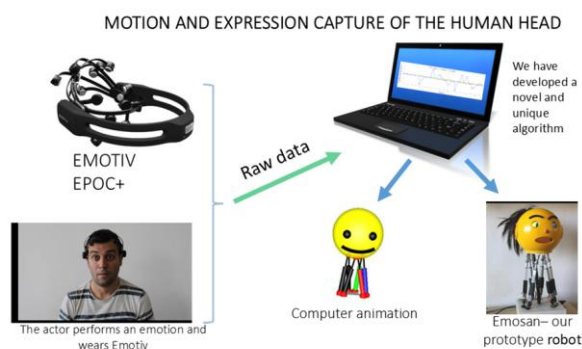


Fig. 1. Motion and expression capture of the human head

The robot kinematic design is based on parallel mechanisms with six degrees of freedom. Thus, the moving platform can be translated along three axes and rotated about these three axes to reinstate the movements of a human head. The motion of the moving platform of the robot is realized by the length variation of the six legs which connect the two platforms (the base and the moving platforms) of the robot. An algorithm for motion capture, which can provide a true replication of the robot movement, was developed in [4].

Hypothesis 1 was confirmed in the study, involving children with communication difficulties, following the approval of the

Ethics Committee for Scientific Research of IR-BAS. They enjoyed the game with EmoSan and were interested in the expressed emotions by the robot. Therefore, the kinematic mechanism of the robot head movement, based on a neuro-realistic principle of implementation, contributed to its better user acceptance.

2. CONTROL ALGORITHMS TO OPTIMIZE THE WALKING CYCLE OF AN INNOVATIVE WALKING ROBOT BIGFOOT

The BigFoot robot's construction is based on minimalist design principles - only two motors are used, with which Big Foot can walk and even overcome obstacles. A new model of the robot has been created, equipped with various types of sensors, some of which provide information necessary for the implementation of an optimized walking cycle and the ability to explore uneven terrain (Fig. 2).

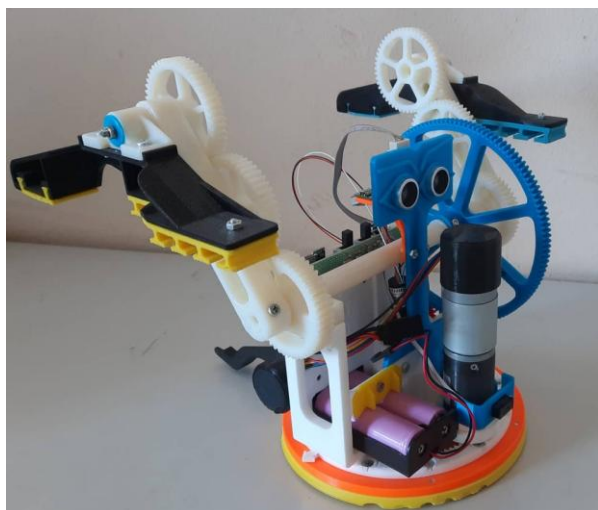


Fig. 2. A 3D printed new model of the BigFoot robot

Two laws of motion have been proposed and compared – sinusoidal and polynomial. Both proposed laws attempt to find a balance

between minimizing impact loads and maximizing walking speed. The experimental results were obtained using a 3D-printed working prototype of the robot, with the correct implementation of the motion laws being ensured through the use of a PD controller receiving data from encoders and tactile sensors [5]. Movies of the experiments can be seen here:

- Experiment for scanning unevenness in the terrain using the robot and its sensors: <https://youtu.be/RYRJZcYdIX>—Video
- Experiment for comparing the proposed control laws: <https://youtu.be/zo1276JLs0k>

The different types of solutions to the inverse kinematics problem for planar robots with serial topology are defined in a new way and an algorithm for solving it is proposed. The developed algorithm allows finding solutions for a wide range of robots by using a geometric approach representing points in a polar coordinate system.

Inverse kinematics, which is one of the most important, most studied, and difficult problems in robotics, aims to calculate the values of joint variables given the desired position and orientation of the robot's end effector [6]. New programs have been created that use the proposed in [5] algorithm for robots with two and three rotational degrees of freedom and graphically present the results in the workspace and configuration space [7]. Therefore, hypothesis 2 about the improved speed and precision of robot movement and rotation is confirmed. The results are important for motion planning and kinematic analysis of robots.

3. BIGFOOT APPLICATION IN DESIGN OF PEDAGOGICAL TOOLS FOR INCLUSIVE EDUCATION

A novel application of the walking robot BigFoot was designed as a game for children, with, or without, learning difficulties, which

develops their spatial skills and visual attention [8].

A game for robot control with a keyboard of a laptop, or with the gaze, was developed. The main panel of the interface for robot control via a joystick or eye gaze is in Fig. 3.

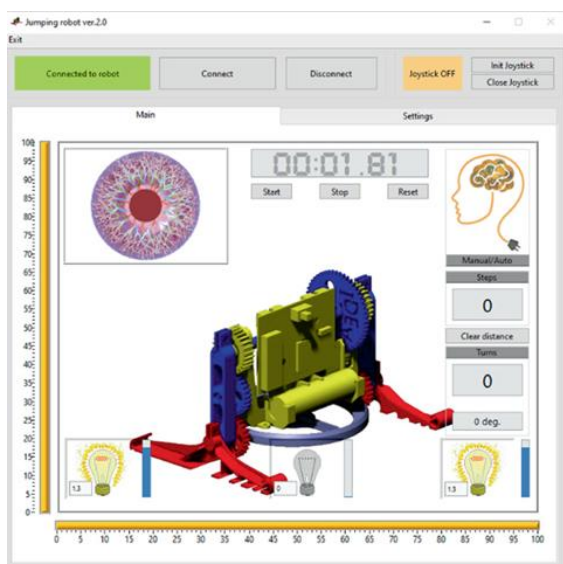


Fig. 3. Main panel of the BigFoot robot game.

Reproduced from [8] under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

The game was piloted at a day centre for children with developmental problems in Sofia after approval of the Ethics Committee for scientific research of IR-BAS.

The control interface presented four large buttons on the monitor of the laptop. When the gaze is focused on a button for a certain time interval – 0.5 sec, then the robot moves in the respective direction – going forth/back or rotating left/right and going. The control panel of the robot movement via the gaze is in Fig. 4. The gaze is tracked via Tobii Eye Tracker [10].

Hypothesis 3 was based on the assumption that the idea for directing the robot movement

by focusing the gaze at a large button on the monitor is sufficiently salient for the child from the mutual position of the buttons. If it was difficult to manage the hands on the keyboard, the child would use the gaze. This hypothesis was partially confirmed, since the idea for controlling the robot with one's gaze was not salient, and required explanation by the parent/teacher.

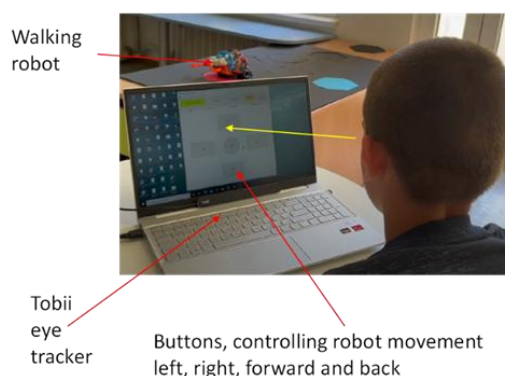


Fig. 4. Gaze control of robot movement via Tobii Eye Tracker. Photo from a personal archive

At the same time the game was especially appropriate for children with hyperactivity. It helped the child stay focused and gave the feeling of empowerment. It became evident that gaze control of a device like a robot may be a valuable therapeutic approach for children with hyperactivity and may help develop better attentional focus, as well as better motor control over the hands. A child with cerebral palsy, initially reluctant to control the robot with the gaze, while observing the other children playing, grasped the idea of the game and showed signs of enjoyment of the situation. The study was in line with the effect of emotional empathy in child-robot interaction [11].

Therefore, the eye tracking data, potentially collected from each child, is important for formulating novel therapeutic approaches and pedagogical applications.



CONCLUSION

The paper presented robotic technologies, developed by the team of the Mechatronics and Robotics Lab of the CCMEEST, which were implemented following cognitive principles for achieving better performance. This was especially meaningful in the proposed novel applications of designed games for children with learning and communication difficulties. The developed interfaces for robot control implemented cognitive biometrics via a brain tracker and eye tracking devices. Future work will test the implementations in a more structured way. For example, more emotions will be transferred to the robot EmoSan. Some autonomy of BigFoot robot in the game with the children is also foreseen. In overall, the research demonstrated the potential of cognitive biometrics for design of novel interactive technologies for therapy, as well as pedagogical and social applications.

Acknowledgement

This research was funded by the European Regional Development Fund under the Operational Program “Scientific Research, Innovation and Digitization for Smart Transformation 2021-2027”, Project CoC “Smart Mechatronics, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies”, BG16RFPR002-1.014-0005.

REFERENCES

- [1] Nderitu, J. H. (2023). Mental State Adaptive Interfaces as a Remedy to the Issue of Long-term Continuous Human Machine Interaction. *Journal of Robotics Spectrum*, 1, 078-089.
- [2] Chien, Y. L., Lee, C. H., Chiu, Y. N., Tsai, W. C., Min, Y. C., Lin, Y. M., ... & Tseng, Y. L. (2022). Game-based social interaction platform tracking. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 31, 749-758.
- [3] Dachkinov P, Tanev T, Lekova A, Batbaatar D, Wagatsuma H (2018). Design and motion capabilities of an emotion-expressive robot EmoSan. In: joint 10th international conference on soft computing and intelligent systems and 19th international symposium on advanced intelligent systems SCIS&ISIS2018, pp 1332-1338, 5-8 December, 2018, Toyama, Japan
- [4] Tanev, T.K., Lekova, (2022) A. Implementation of Actors' Emotional Talent into Social Robots Through Capture of Human Head's Motion and Basic Expression. *International Journal of Social Robotics* 14, 1749–1766. <https://doi.org/10.1007/s12369-022-00910-0>
- [5] Chavdarov, I.; Yovchev, K.; Miteva, L.; Stefanov, A.; Nedanovski, D. A Strategy for Controlling Motions Related to Sensory Information in a Walking Robot Big Foot. *Sensors* 2023, 23, 1506. <https://doi.org/10.3390/s23031506>
- [6] Morecki, A., Knapczyk, J. (1999). The Inverse Kinematics of Manipulators. In: Morecki, A., Knapczyk, J. (eds) *Basics of Robotics*. International Centre for Mechanical Sciences, vol 402. Springer, Vienna. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2532-8_4
- [7] Chavdarov, I.; Naydenov, B. Algorithm for Determining the Types of Inverse Kinematics Solutions for Sequential Planar Robots and Their Representation in the Configuration Space. *Algorithms* 2022, 15, 469. <https://doi.org/10.3390/a15120469>
- [8] Nikolov, V., Dimitrova, M., Chavdarov, I., Krastev, A., Wagatsuma, H. (2022). Design of Educational Scenarios with BigFoot Walking Robot: A Cyber-physical System Perspective to Pedagogical Rehabilitation. In: Ferrández Vicente, J.M., Álvarez-Sánchez, J.R., de la Paz López, F., Adeli, H. (eds) *Artificial Intelligence in Neuroscience: Affective Analysis and Health Applications. IWINAC 2022. Lecture Notes in Computer Science*, vol



13258. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-06242-1_26

[9] EMOTIV EPOC+.
<https://www.emotiv.com/epoc/>

[10] Tobii Eye Tracker.
<https://www.tobii.com/products/eye-trackers/screen-based>

[11] Giannopulu, I., Terada, K., & Watanabe, T. (2018). Emotional empathy as a mechanism of synchronisation in child-robot interaction. *Frontiers in Psychology*, 9, 1852.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01852>



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

МОДЕЛИРАНЕ НА СИСТЕМА НА ОТОПЛЕНИЕ И БИТОВА ГОРЕЩА ВОДА

MODELING OF A HEATING AND DOMESTIC HOT WATER SYSTEM

Plamen Penchev

Technical University of Gabrovo

Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract

The operation of a heating system with solar collectors is simulated. The results show that the share of solar coverage for heating of the building reaches 39%. The share for domestic hot water is 96%. The total share of the heating and domestic hot water system reaches 50%.

Keywords: Solar system, Hot water system, Domestic hot water, Solar collectors.

ВЪВЕДЕНИЕ

При соларното подпомагане на отоплението освен разхода на топла вода трябва да се отчете и необходимата отоплителна мощност. При оразмеряване на соларната система се цели соларен дял от общата отоплителна потребност между 10 и 40 %, [1], [2], [3].

Като правило по-стари къщи имат по-голяма отоплителна потребност, достигаща до $200 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Макар при такива сгради оразмерената соларна система да би намалила енергийния разход, то соларният дял все пак остава в незначително количество. Във връзка с оразмеряването на термични соларни инсталации с подпомагане на отоплението се среща понятието отоплителен товар. Съгласно DIN EN 12831 отоплителният товар се дава или в kW или, отнесен към отоплителна площ, в W/m^2 . Както и отоплителната потребност, отоплителният товар зависи от изолацията

на сградата и метеорологичните дадености. В сграда отоплителна потребност $\leq 70 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, тя е съизмерима с енергийната потребност за производство на БГВ. В пасивна сграда с отоплителна потребност около $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ соларното подпомагане на отоплението не може да се отрази значително в отоплителната ѝ потребност, тъй като отоплителният период съвпада с месеците със слабо слънцегреене.

Конвенционалните отоплителни инсталации работят с температура на подаване от 50 до 70°C . В сезоните със слабо слънцегреене колекторите много рядко могат да достигнат това високо температурно ниво. Ако обаче е инсталирано подово или стенно отопление, соларната инсталация може да постигне ниската температура на подаване и връщане ($35/25^\circ \text{C}$). В такива инсталации соларният дял в отоплителната потребност може да бъде в порядъка 20 до 40 %.



ИЗЛОЖЕНИЕ

Изследваната система се намира в Център по Компетентност при ТУ- Габрово и състои от буферен съд с вместимост 1000/ с възможност за доподгряване на отоплението, бойлер 300/ за БГВ, термopомпи и газови котли отоплителната и климатична инсталация, Фиг.1. Общата колекторна площ е 30m². Енергията от колекторите се пренася към буферния съд посредством пластинчат топлообменен апарат с мощност 45 kW при температура на подаващата и връщаща соларна течност съответно 60-40°C. През летния период, когато не се използва отопление, енергията от слънчевите колектори се събира в буферен съд и посредством друг бързонагриващ топлообменен апарат се подава към системата за БГВ. Теплообменният апарат е с проектна мощност 30 kW при температура на подаващата и връщащата вода съответно 60-40°C.

За точно оразмеряване е необходимо да се знае общата загуба на налягане $\Delta p_{\text{общ}}$ в соларната система.

Общата загуба на налягане е сбор от загубата на налягане в колектора, в соларния контур и в топлообменника:

$$\Delta p_{\text{общ}} = \Delta p_{\text{кол}} + \Delta p_{\text{с.к}} + \Delta p_{\text{ТА}}, Pa \quad (1)$$

Загубата на налягане в колекторите $\Delta p_{\text{кол}}$ зависи от конструкцията, дебита и вида на свързване на колекторите помежду им. При паралелно свързване на повече колектори загубата на налягане на колекторното поле съответства на тази на един колектор.

Диаметърът на тръбите в соларния контур трябва да се оразмери така, че скоростта на потока да не превишава стойността от 0.7 m/s. При по-високи скорости на потока може да се стигне до шумове в инсталацията, а над 1 m/s до износване на мате-

риал от медните тръби. От друга страна е необходим определен дебит за пренасянето на топлина от колектора към бойлера и буфера. Въз основа на практически опит е установен минимален дебит в соларния контур в инсталации до 30 m² колекторна площ от порядъка на 40 l/m²h, [4], [6].

Следователно минималният дебит в системата може да се определи по зависимостта

$$\dot{V} = A\dot{v}, l/h \quad (2)$$

Където A е нетната площ на колекторите, m².

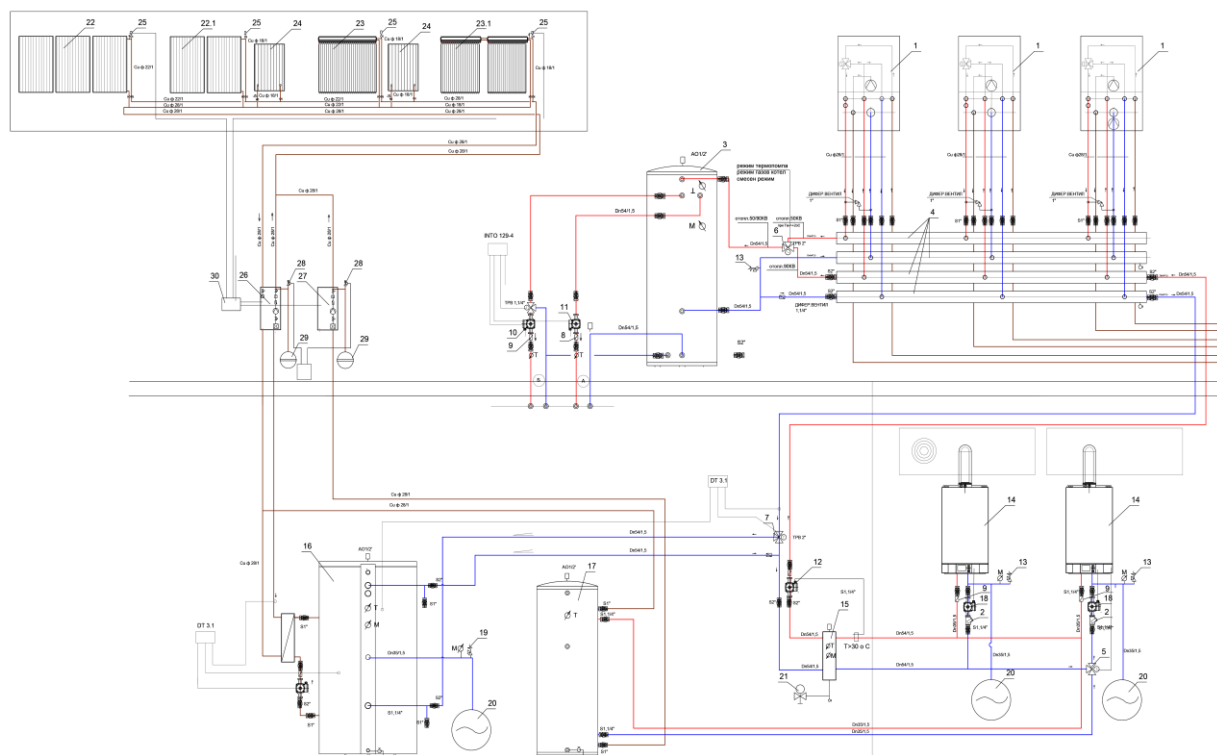
От величините дебит и ограничението за скорост на потока $w=0.7m/s$ може да бъде изчислен вътрешния диаметър на тръбата на соларния контур по уравнението:

$$d_i = \sqrt{\frac{4\dot{V}}{\pi w}}, m \quad (3)$$

За диаметъра на тръбата се получава 0.0245m. Приема се медна тръба с размери 28x1.5 mm с вътрешен диаметър 25 mm. Загубата на налягане на соларния контур $\Delta p_{\text{с.к}}$ се състои от загубата на налягане на тръбопроводите $\Delta p_{\text{тр}}$ и сумата от загубата на налягане на вградената арматура $\Delta p_{\text{ар}}$.

Специфичната загуба на налягане може да бъде взета от номограми. Тук трябва да се има предвид материала на тръбата и концентрацията на сместа вода- пропиленгликол. Загубата на налягане от колена, Т-елементи, вентили и арматури следва да се вземат от таблиците в документации към тях или се преценяват общо на 1/3 от загубите на тръбопровода.

В случая дебита в соларната система е 1200 l/h при диаметър на тръбите (28x1.5) mm. Тръбният път е с дължина 40 m. От номограми се определя относителния пад на налягане, който в случая е $\Delta p_{\text{тр}}=3 mbar/m$.



Фиг.1 Схема на изследваната система

Следователно за загубата на налягане в соларния контур може да се запише:

$$\Delta p_{c.k} = \Delta p L = 120 \text{ mbar} \quad (4)$$

Загубата на налягане в арматурите е

$$\Delta p_{ap} = \frac{\Delta p_{c.k}}{3} = 40 \text{ mbar} \quad (5)$$

Загубата на налягане в топлообменника на соларния контур $\Delta p_{та}$ трябва да се определи в зависимост от типа топлообменник и скоростта на потока съгласно съответната продуктова документация. За използвания тип топлообменен апарат пада на налягане е $\Delta p_{та}=160\text{mbar}$.

Загубата на налягане в колекторите, се определя също по номограми и възлиза на 150 mbar.

Тогава, общата загуба на налягане в системата ще бъде 630 mbar.

При оразмеряване на буферния резервоар за соларни инсталации, предвидени за средно покритие на потребностите може да се използва следния подход.

- V_6 = обем на буфера (l)
- $A_{ж}$ = жилищна площ (m^2)
- v_6 = специфичен обем на буфера за всеки m^2 колекторна повърхност при базова стойност 70 l/ m^2
- a = специфична жилищна площ за всеки m^2 колекторна площ при базова стойност 15 m^2/m^2 . Тогава

$$V_{\sigma} = A_{\text{жс}} v_{\sigma}, l \quad (6)$$

В случая, буферният съд е предварително избран да е 1000 l. За оразмеряването на разширителния съд роля играят освен обусловените от температурата промени в обема на соларната течност също и обема на изпаренията в съдържанието на колектора и на съединителните тръби в случай на авария на инсталацията.

Минималният обем на разширителния съд се изчислява, както следва:

$$V_n = \frac{V_v + V_2 + zV_k}{p_e + (p_{s,t} + 0.5)} (p_e + 1), l \quad (7)$$

$V_v = 0.005V_A$ - този обем трябва да предотврати образуването на подналягане в соларния контур. Тя възлиза на 0.5 % от обема на инсталацията, но най-малко 3 l. Това означава, че при обеми на инсталацията до 600 литра резервът течност винаги е 3 l;

V_A -наливният обем на система, l; V_2 -увеличението на обема при нагряване на системата - $V_2 = V_A \times \beta$, където $\beta = 0.13$ - коефициент на разширение на топлоносителя; p_e -допустимото крайно налягане, bar.

$$p_e = p_{si} - 0.1p_{st}, bar \quad (8)$$

p_{si} - налягането на сработване на предпазния клапан, bar

p_{st} - налягането на азота на входа на MPC, bar

Налягането на инсталацията на пълнене p_a трябва да е толкова голямо, че при никакви работни условия да не може да попадне въздух в инсталацията в следствие на подналягане. В най-високата точка на инсталацията налягането трябва да е поне 1.5 bar. Тъй като мембранный разширителен съд най-често се намира в мазето, към това минимално налягане следва да се

прибави статичното налягане на инсталацията. Тя се изчислява от височината на инсталацията и специфичната разлика на налягане от 0.1 bar/m.

$$p_{st} = 1.5 + 0.1H, \quad (9)$$

където H е статичната височина, m;
 z -брой на колекторите;

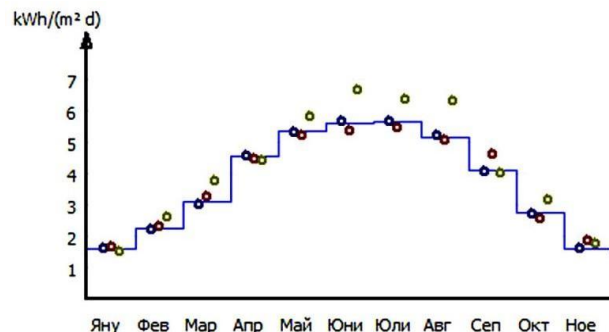
V_k -обем на колекторите, l.

След заместване в зависимостта (7) за обема на MPC се получава приблизително 80l.

За симулиране на процесите в системата е използван продукта Bosch Solar Simulation [5].

Резултатите от симулацията са представени в таблици и графики по-долу.

На Фиг. 2 са представени предвижданията на WetSyn за слънцегреенето в гр. Габрово за следващите три години напред, представени като отношение на kWh/m²d за различните месеци през годината.



Фиг. 2 Прогнозни резултати за слънцегреенето над гр. Габрово

В данните за симулацията е предвидено подгряването на водата за отоплителни нужди да се извършва с термopомпи «въздух-вода» с максимален COP 4.5 и газови кондензни котли при температура на топлоносителя 35/25 °C.

В Табл. 1 са представени данните от симулацията на системата, където ясно се вижда относителният дял на соларното покритие.



Табл.1 Соларен добив на системата

Месец	Соларен добив <i>kWh</i>	Соларно отопление <i>kWh</i>	Слънцегрееене <i>kWh</i>	Допълнителна енергия <i>kWh</i>	Дял БГВ %	Соларно покритие отопление %	Ефект ивнос т %
Януари:	536	370	2268	24	85	18	24
Февруари:	736	570	2558	18	90	34	29
Март:	969	770	3285	0	100	57	29
Април:	954	758	4383	0	100	91	22
Май:	276	78	4785	0	100	100	6
Юни:	193	0	4833	0	100	0	4
Юли:	199	0	5012	0	100	0	4
Август:	197	0	4804	0	100	0	4
Септември:	212	21	4067	0	100	85	5
Октомври:	810	618	3243	6	97	76	25
Ноември:	553	379	2009	15	92	29	28
Декември:	492	340	1952	33	81	18	25
Сума:	6126	3905	43198	96	96	39	14

Общ дял на соларното покритие 50%.

Табл.2 Екологичен баланс на системата

Месец	Соларен добив, <i>kWh</i>	Икономия на енергия <i>kWh</i>	CO ₂ икономия, kg
Януари:	536	191	153
Февруари:	736	263	210
Март:	969	269	215
Април:	954	265	212
Май:	276	66	53
Юни:	193	43	34
Юли:	199	44	35
Август:	197	44	35
Септември:	212	49	39
Октомври:	810	225	180
Ноември:	553	162	130
Декември:	492	176	141
Сума	6126	1797	1438

В Табл. 1 са представени данните от симулацията на системата, където ясно се вижда относителният дял на соларното покритие.

От табличните резултати може да се изчисли, че средният годишен добив на един m^2 колекторна площ е $204 kWh/m^2$.

В Табл. 2 е показана икономията на енергия и CO₂ при използването на възобновяемите енергийни източници.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От резултатите, получени от симулацията на работата на системата, ясно се вижда, че общият средно-годишен дял на соларно покритие за отопление на сградата е 39%, докато делът за битова гореща вода достига 96%. Общият дял на соларното покритие за топла вода и отопление е 50%. Делът за отопление на сградата от слънчевите колектори може да осигури частично подпомагане на системата в месеците март, април, май и октомври.

Резултатите от симулацията на работата на системата, както и последвалата и експлоатация, недвусмислено показват, че за увеличаване на соларния дял за производс-



тво на енергия за отопление е необходимо увеличаване на колекторната площ.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пенчев П., Изследване характеристиките на комбинирана система за отопление и битова гореща вода., *Science & Technologies, Volume VI, Number 4: Technical Studies*, pp 86-93, 2016
- [2] Пенчев П., Изследване на характеристиките на комбинирана слънчева система и буферен съд за подгряване на отопление и битова гореща вода – част 1 - теоретична постановка, *Science & Technologies, Volume X, Number 3: Technical Studies*, pp 28-34, 2020
- [3] Пенчев П., Изследване на характеристиките на комбинирана слънчева система и буферен съд за подгряване на отопление и битова гореща вода – част 2 – резултати от изследването, *Science & Technologies, Volume X, 2020, Number 3: Technical Studies*, pp 35-39, 2020
- [4] Термична соларна техника-документация за планиране, *Robert Bosch GMBH*, 2012
- [5] Bosch Solar Simulation V2.1.5, *Robert Bosch GMBH*, 2012
- [6] Kalogirou S. A., *Solar Energy Engineering, Processes and Systems*, Second edition, *Elsevier Inc.*, 2014



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

НИСКОТЕМПЕРАТУРНО PVD НАНАСЯНЕ И МЕХАНИЧНО ХАРАКТЕРИЗИРАНЕ НА CR-N ПОКРИТИЕ ВЪРХУ БЪРЗОРЕЗНА СТОМАНА P6M5

LOW-TEMPERATURE PVD DEPOSITION AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF CR-N COATING ON P6M5 HIGH-SPEED STEEL

Chavdar Pashinski

¹ Technical University of Sofia, Br. Plovdiv, Department of Mechanics

² Center of competence "Smart mechatronic, eco- and energy saving systems and technologies"

³ Bulgarian Academy of Sciences, Central Laboratory of Applied Physics

e-mail: pashinski@yahoo.com

Abstract

Nowadays, practically every cutting tool has a hard (or superhard) coating deposited to enhance its mechanical properties. Over time, these coatings have evolved and today various multilayer, nanolaminate, nanocomposite, etc. structures were developed and applied. But, the long-known monolayer (monolithic) coatings are still relevant in certain situations. Here, one technological process for low-temperature deposition of a monolayer CrN coating on P6M5 high-speed steel is described and a subsequent testing of its mechanical properties is considered. The obtained results show high hardness combined with excellent adhesion and a low stable coefficient of friction.

Keywords: chromium nitride; hard coatings; PVD; CFUBMS; mechanical properties

ВЪВЕДЕНИЕ

Нанасянето на тънки ($2\div 3\ \mu\text{m}$) твърди и свръхтвърди покрития върху обработващи инструменти е рутинна съвременна процедура. Те способстват за: увеличаване на работния ресурс на инструмента, излизане извън нормално предвидената работна зона (завишавайки елементите на режима на рязане), намаляване или дори премахване нуждата от смазочно-охлаждаща течност [1, 2]. Понастоящем, споменатите покрития освен желателни, са вече почти задължителни в някои случаи - примерно, приблизително $90\div 95\%$ от предлаганите WC/Co

инструменти са с нанесено твърдо или свръхтвърдо покритие [1]. Респективно, изследванията в тази област, подтикнати от нуждите на индустрията, доведоха до създаването на голямо разнообразие от покрития.

За нанасянето им, особено подходящи и наложили се в последните десетилетия са група технологии, известни под общото наименование *физично парно отлагане* (Physical Vapor Deposition, PVD). Една от най-често използваните от тях е *магнетронното разпрашване* (Magnetron Sputtering, MS), като основното ѝ предимство е голя-



мата чистота на нанасяните слоеве. Обикновено, степента на йонизация при технологичен процес на MS не е висока, но в разновидността му (използвана в случая) *разбалансирано магнетронно разпръскване в затворено поле (Closed Field Unbalanced Magnetron Sputtering, CFUBMS)*, тя нараства значително. За тази технология е препоръчителен четен брой магнетронни източници (като някой може да бъде заместен от подходящ магнит), при което силовите линии на магнитното поле частично навлизат в камерата, както и се прехвърлят между самите източници, като по този начин се задържат йонизиращите електрони и плазмата се подобрява [3].

Покритието CrN е едно от първите, нанасяни чрез PVD. Често, твърдостта му е под границата, дефинираща твърдите покрития (20 GPa). Въпреки това, то е много използвано при формовачни инструменти поради нисък коефициент на триене (спрямо различни обработвани материали), антиадхезия, устойчивост при високи температури (до ок. 800 °C) и др. Върху режещи инструменти то се използва ограничено, обикновено при обработка на дърво [4] и някои сплави на цветни метали [5].

Важно предизвикателство, свързано с нанасянето на еднослойно подобно покритие, е постигането на възможно по-висока твърдост при запазване на добра адхезия към подложката. Значителен компонент от твърдостта в случая се дължи на създадени вътрешни натискови напрежения при нанасянето, които вредят на адхезията. Важен допълнителен проблем за адхезията се явява протичането на процеса при относително ниска температура (под 200 °C), което от своя страна гарантира запазване на механичните свойства на подложката.

В тази публикация се описва режим (рецепта) за нанасяне на еднослойно CrN покритие при ниска температура, което в последствие показва отлични механични

свойства, неотстъпващи на тези, характерни за подобни покрития създадени при по-висока температура. В последствие, това покритие вече се нанася за клиенти на Централна лаборатория по приложна физика, БАН.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДАННИ

Опитните образци са дискове от бързорезна стомана P6M5 с диаметър 13 mm и дебелина 5 mm. Те са закалени до 63 HRC и фино шлайфани до $Ra = 0,28 \mu m$.

За нанасяне на покритието бе използвана установка UDP850-4 (Teer Coatings Ltd.), където се използва технологията CFUBMS. Тази установка е допълнително оборудвана и доработена от Централна лаборатория по приложна физика, БАН, за да отговаря на практическите нужди на индустрията.

След предварително механично и химично почистване - в ултразвукова вана с мек алкален разтворител Desconex HT 1170 (Borer Chemie AG), образците бяха закрепени към карусел с двуосно въртене. Работната камера беше изпомпена до достигане на налягане $2,0 \cdot 10^{-5}$ Torr. След това започна нагряване до 140 °C, като на задвижващия привод бе зададена честота на въртене от 5 rpm. Последва почистване с аргонни йони в продължение на 30 min, като към карусела (образците) се подаде високо напрежение -500 V (импулсен режим, честота: 250 kHz, пауза между импулсите: 500 ns). Дебитът на използвания газ Ar беше 25 sccm (този параметър не се промени до края на работния процес).

Нанасянето започна с разпръскване от две срещуположни Cr мишени при работен ток от 6 A (в камерата имаше още две мишени: Ti и Al, на които се подаде ток от 0,5 A, за да се предотврати замърсяването им). Опорното напрежение към карусела бе понижено до -70 V/250 kHz/500 ns (последното не се промени до края на работ-

ния процес).

Първоначално, за изграждане на тънък адхезионен слой от Cr, системата работи в описаното състояние 10 min. След това се отложи преходен градиентен слой от CrN в продължение на 40 min, като започна постепенно натичане на N₂. За контрол на дебита му се използваше *оптичен емисионен мониторинг (Optical Emission Monitoring, OEM)*, като заданията се променяха от 95% до 80%. На тях съответстваше дебит, който се повишаваше постепенно от 3,8 до 21,0 sccm. След това, при достигане на горната граница, процесът продължи без промяна на дебита, като се осъществи същинското нанасяне на работния слой от CrN в продължение на 120 min при задание на OEM от 80 %. Стойността на дебита леко намаля до края на нанасянето до 20,5 sccm.

Описаният процес се проведе при налягане $1,6 \cdot 10^{-3}$ Torr. Температурата, поради изграждането на покритието, се повиши до 166 °C до края на процеса.

След нанасянето на покритието се изчака, докато температурата на образците спадне до 120 °C, след което камерата се развакумира и образците бяха извадени.

Дебелината беше измерена чрез калотестер (проектиран в Централна лаборатория по приложна физика, БАН). За издълбаване на сферичния шлиф бе използвана топка от лагерна стомана с диаметър 30 mm. Шлифът бе наблюдаван, измерен и фотографирал чрез оптичната система на описаната по-долу апаратура.

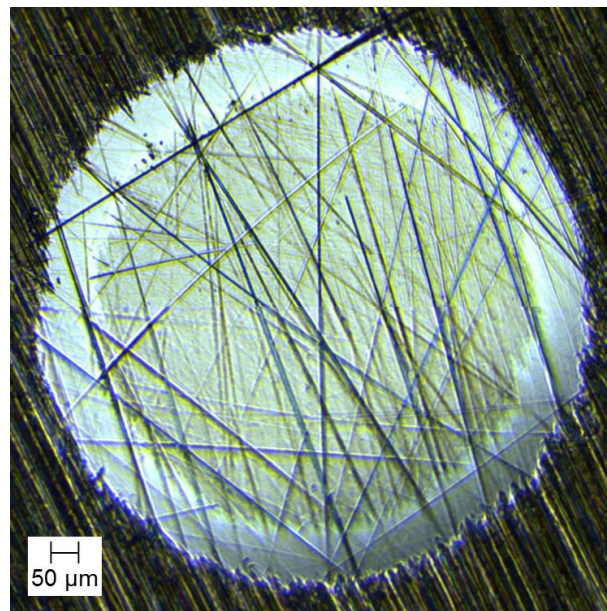
Механичните изпитвания на образците се извършиха чрез Compact Platform CPX (MHT/NHT) (CSM Instruments, Anton Paar GmbH). Нанотвърдостта и модула на еластичност бяха определени чрез метода на Оливър-Фар (Oliver-Pharr), който е софтуерно заложен в устройството. Използва се

5 s задържане на максималната натоварваща сила от 50 mN, а коефициента на Поансон за покритието бе приет със стойност 0,25 [6]. Получените и показани в следващия параграф стойности са средноаритметични от 5 последователни измервания.

Адхезията беше измерена чрез Micro Scratch Tester (MST) модул, който е част от горното оборудване (CSM Instruments, Anton Paar GmbH). Беше използван диамантен индентор Рокуел със закръгление на върха от 200 µm, като дистанцията на плъзгане беше 1 mm. Натискът беше линейно от 0,5 до 30 N със скорост 1 N/min.

АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

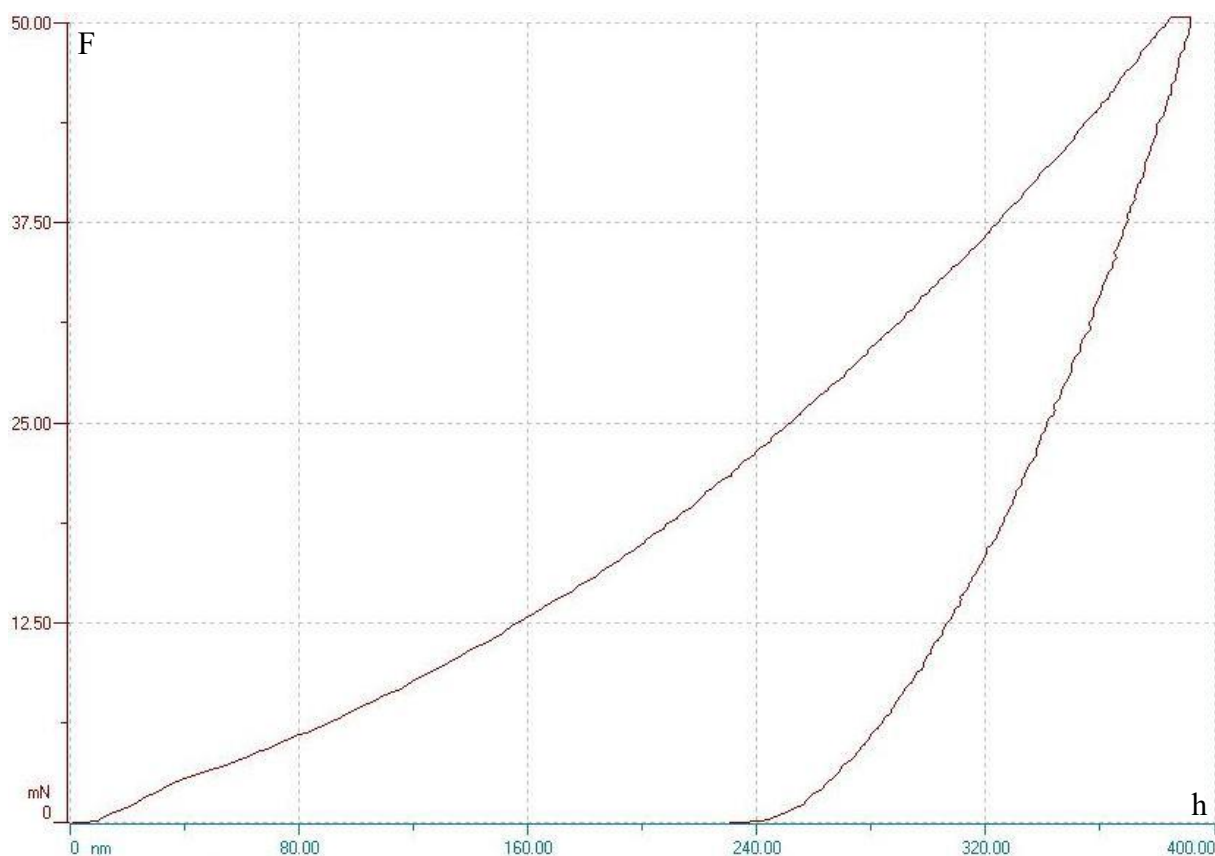
Покритието има характерен сив цвят, като органолептично може да се заключи, че е приблизително стехиометрично. При калотеста не възникнаха нарушения в покритието, което индиректно подсказва за ниски вътрешни напрежения в него, респективно – добра адхезия (фиг. 1).



Фиг. 1. Сферичен шлиф

Дебелината на покритието бе изчислена с помощта на формулите, поместени в [7]. Получената стойност е приблизително 2,500 μm . Натоварващо-разтоварващата крива от

наноиндентирването е поместена на фиг. 2. Плавноста на кривата доказва, че не се създават пукнатини в зоната на индентирване.



Фиг. 2. Натоварващо-разтоварваща крива от наноиндентирването

Дълбочината на индентирване h има максимална стойност 391 nm, което е около 15% от дебелината на покритието (2,500 μm). Това гарантира, че получените стойности за твърдостта и модула на еластичност се отнасят най-вече за самото покритие (влиянието на подложката може да се пренебрегне) [8]. Използваната натоварваща сила $F = 50$ mN гарантира избягването на проявление на *ефекта на размера при индентация (Indentation Size Effect, ISE)*, които биха повлияли на отчитането [8].

Установиха се следните стойности: нано твърдост $H = 18,9$ GPa и модул на еластичност $E = 375,9$ GPa. Стойността на H е в горния диапазон за CrN покрития [4, 5, 6, 9, 10], което доказва практическата пригодност на създадената работна рецепта.

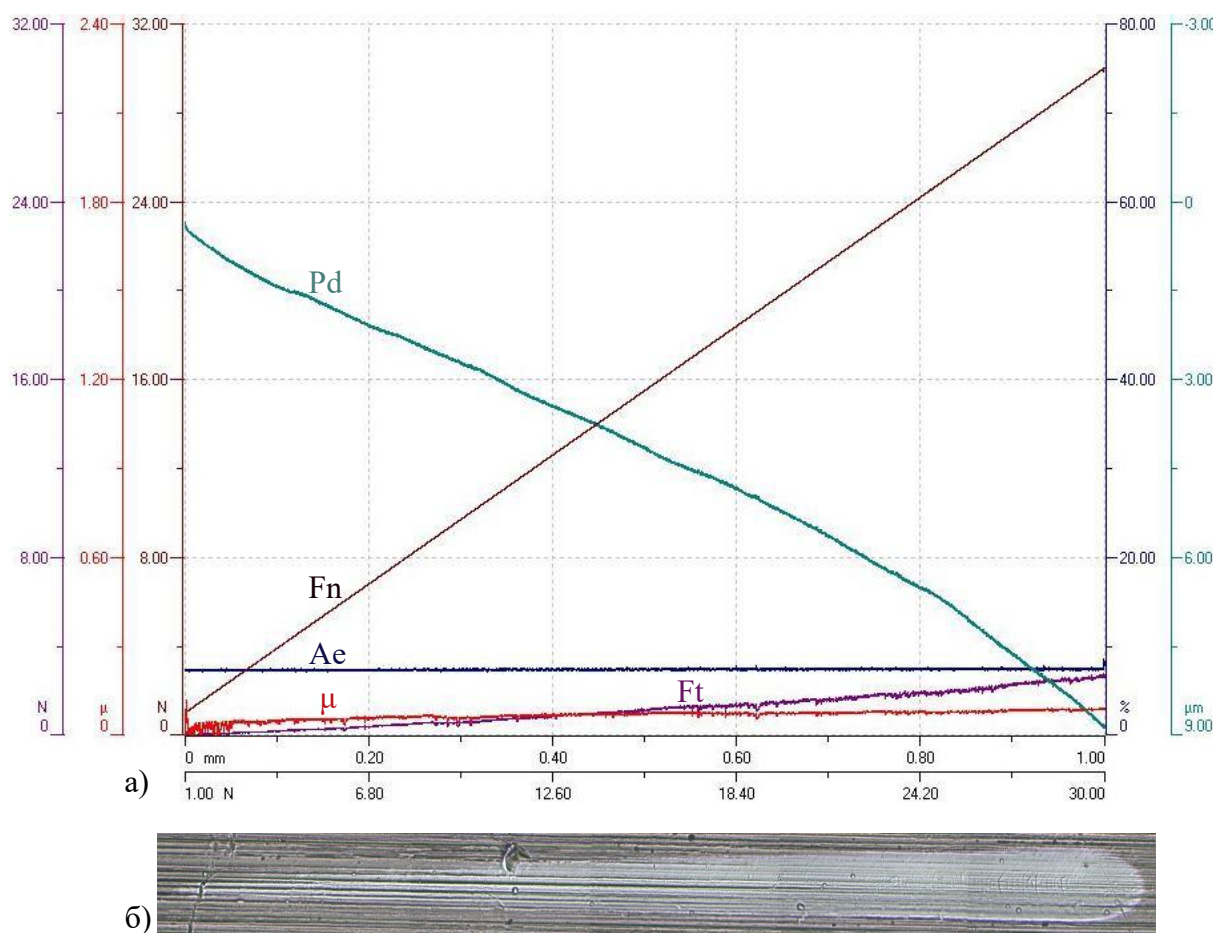
На фиг. 3а е показана диаграма от скрач-теста. Линейното изменение на натисковата сила F_n в случая поражда приблизително линейно изменение на силата на триене F_t в резултат на което коефициента на триене μ е практически постоянен.

Отчетеният коефициент на триене $\mu \approx 0,10$ е относително нисък, което е характерно за CrN покритията [4, 5, 9, 10] (получената ниска стойност е свързана и с употребата на диамантен индентор). Този коефициент е почти постоянен, т.к. покритието е еднослойно и няма промяна в контактуващата двойка материали (покритието и диамантения индентор). Все пак, вижда се, че дълбочината на проникване Pd е значителна, надвишаваща дебелината на покритието.

то. Въпреки това, коефициентът на триене се запазва като стойност.

Поради гладкостта на кривите на акустичната емисия Ae и коефициента на триене μ , може да се заключи, че няма значими нарушения на покритието, респективно деламинация.

Това се потвърждава и от снимката на следата, показана на фиг. 3б. Видно е, че липсват адхезионни нарушения, затова не може да се дефинира дори т.н. първо критично натоварване L_{C1} .



Фиг. 3. Скрач-тест: а) диаграма; б) следа

Следователно, може да се приеме, че адхезията на нанесеното покритие е отлична при натоварвания до 30 N (максималната

стойност, която може да се приложи с наличното оборудване).



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен е технологичен режим за нискотемпературно нанасяне на еднослойно CrN покритие върху бързорежна стомана Р6М5, гарантиращ висока твърдост, отлична адхезия и нисък постоянен коефициент на триене. Получените резултати са предпоставка за успешно практическо приложение.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Inspektor A, Salvador PA. Architecture of PVD coatings for metalcutting applications: A review. *Surface & Coatings Technology* 2014, vol. 257, pp. 138–153, doi:10.1016/j.surfcoat.2014.08.068.
- [2] Veprek S, Veprek-Heijman MJG. Industrial applications of superhard nanocomposite coatings. *Surface & Coatings Technology* 2008, vol. 202, iss. 21, pp. 5063–5073, doi:10.1016/j.surfcoat.2008.05.038.
- [3] Teer DG. Magnetron Sputter Ion Plating. US Patent 5,556,519, Sep. 17, 1996.
- [4] Warcholinski B, Gilewicz A. Multilayer coatings on tools for woodworking. *Wear* 2011, vol. 271, iss. 11–12, pp. 2812–2820, doi:10.1016/j.wear.2011.05.048.
- [5] Surface Technology Coatings, Chromium Nitride Brochure, Available at: <https://www.surftech.com.au/coating-types/crn/>, 2025 (Sep. 12).
- [6] Brögelmann T., Bobzin K., Kruppe NC, Arghavani M. Understanding the deformation and cracking behavior of Cr-based coatings deposited by hybrid direct current and high power pulse magnetron sputtering: From nitrides to oxynitrides. *Thin Solid Films* 2019, vol. 688, Article 137354, doi:10.1016/j.tsf.2019.06.004.
- [7] CSM Instruments. Calotest®: Руководство пользователя, версия: R0.0.2. Санкт-Петербург: ЗАО «Ниеншанц», 2009 (in Russian).
- [8] Veprek S, Veprek-Heijman MGJ, Karvankova P, Prochazka J. Different approaches to superhard coatings and nanocomposites. *Thin Solid Films* 2005, vol. 476, iss. 1, pp. 1–29, doi:10.1016/j.tsf.2004.10.053.
- [9] Aissani L, Fellah M, Nouveau C. Structural Mechanical and Tribological Behavior of Reactive Sputtered Cr-N and Cr-V-N Films. *Diffusion Foundations* 2018, vol. 18, pp. 27–34, doi:10.4028/www.scientific.net/DF.18.27.
- [10] Jafarzadeh M, Khojier K, Savaloni H. Influence of Nitrogen gas flow on mechanical and tribological properties of sputtered chromium nitride thin films. *Advanced Materials Research* 2014, vol. 829, pp. 497–501, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.829.497.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

РАЗРАБОТВАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПОЗИЦИОНИРАЩА СИСТЕМА ЗА ЛАЗЕРНО ПОВЪРХНОСТНО ЗАКАЛЯВАНЕ НА СЛОЖНИ 3Д ПОВЪРХНИНИ

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF POSITIONAL SYSTEM FOR LASER SURFACE HARDENING OF COMPLEX 3D SURFACES

Prodan Prodanov

Technical University of Gabrovo

Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Borislav Stoyanov

Technical University of Gabrovo

Abstract

The application of surface treatment technologies relies on precise positioning systems, usually multi-axis, implemented through industrial robots or coordinate machines. As the main processing tool, a laser head with suitable power is employed to meet the requirements of the technological process. Frequently, these systems are complemented by a third component – a measuring system that provides feedback and control. In many cases, a pyrometer is used as this measuring element, since it allows for non-contact surface temperature monitoring. This paper introduces a solution that integrates positioning, processing, and measurement subsystems based on the modules described above. Current industrial production trends emphasize combining advanced positioning mechanisms with eco-friendly and energy-efficient processing tools. Depending on the application, the tool can operate in different modes: subtractive (CNC machines for selective material removal), additive (technologies such as laser welding or 3D printing), or surface modification (processes like quenching or heat treatment). All these approaches merge the benefits of high-precision servo-driven positioning systems with low-energy processing heads. The work presented here demonstrates such a production technology: a high-performance positioning system combined with a laser scanning head for effective surface treatment - laser hardening.

Keywords: industrial robot; laser hardening, laser scanner head, pyrometer, robot programing, surface treatment.

ВЪВЕДЕНИЕ

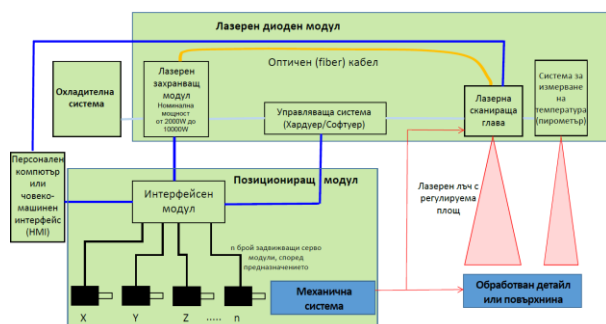
Прилагането на задвижващите и позициониращи системи е насочено към роботизирани механизми (в частност индустриални роботи, с n на брой степени на свобода или възможности за движение и позициониране), като съдържат в себе си задвижващ двигател (сервозадвижване) и позициониращ механизъм (позиционираща система). Към една такава роботизирана система, за да стане актуална на нуждите на дадена технология или технологична операция е нужно да бъде заложен високо-

технологичен и енергоспестяващ работен орган или т. нар технологичен инструмент. Според направените проучвания, в огромен мащаб нужните на бизнеса и индустрията са насочени към комбинирането на лазерните технологии (като технологичен инструмент) за повърхностна обработка на сложни 3D повърхнини и високо функционална задвижваща роботизирана система. Процеси като закаляване, заваряване, рязане и др. използващи лазерни технологии позволяват висока точност, енергийна ефективност, съсредоточаване на голямо коли-

чество мощност в единица обем, едновременно с високо бързодействие и точност. В такъв аспект е направен избор на лазерна глава като технологичен инструмент.

ИЗЛОЖЕНИЕ

В лаборатория С7.2. „Еко- и енергоспестяващи, безконтактни предаватели на електрическа енергия“ е изградена роботизирана система за 3Д лазерно повърхностно закаляване на детайли със сложни повърхнини. Приложението на такива системи, съчетани с високо функционален индустриален робот позволяват решаването на специфичните технологични задачи, намиращи приложение с широк спектър от индустрии: машиностроене, автомобилостроене и др. В структурно отношение, за реализирането на такава високотехнологична система са необходими следните блокове: лазерен диоден модул с необходимата за технологичния процес мощност; позициониращ модул; охладителен модул и персонален компютър (софтуер и/или човеко-машинен интерфейс) – фиг. 1.



Фиг. 1. Блок-схема на система за повърхностна обработка на сложни 3Д повърхнини

Представената структура съдържа: лазерен диоден модул LDM-4000-100 с необходимата за технологичния процес мощност от 4 kW [1]; лазерна сканираща глава OTZ-5 [2] с номинална мощност от 4kW и с възможност за регулируемо лазерно петно посредством варио-оптика до максимални размери (22x43) mm. В системата е

вграден двузонов пирометър който може да измерва и регулира температурата на детайла в диапазон от $(550 - 1500)^{\circ}\text{C}$ [3]. Използването на пирометър дава възможност за измерване и регулиране на температурата на повърхността на детайла по време на технологичния процес „лазерно повърхностно закаляване“.

За позициониращ модул е избран и пуснат в експлоатация индустриален робот тип FANUC M20iD [4] с шест степени на свобода, съответно шест задвижващи оси със серводвигатели, както и в допълнение към него – ротационен едноосен модул [5].

На фиг. 2 е показана изградената система за лазерни термични операции, свързани с повърхностно закаляване на детайли.



Фиг. 2. Позиционираща система за повърхностна обработка на сложни 3Д повърхнини

Допълнителните дейности за превръщането на представената система в обособена структурна единица за провеждане на необходимите научни и експериментални изследвания са свързани с обезопасяването и осъществяването на отдалечен достъп и контрол. За осъществяване на това е изградена обособена „клетка“, изолираща системата в ограничено работно пространство, където са взети всички необходими мерки за осъществяване на безопасност при работа с лазерно оборудване.

Изградени са защитни прегради и заграждения, електрически и електронни системи за защита, блокировки, алармиращи системи, както и системи за видеонаблюдение и отдалечен достъп и контрол – фиг. 3а и фиг. 3б.



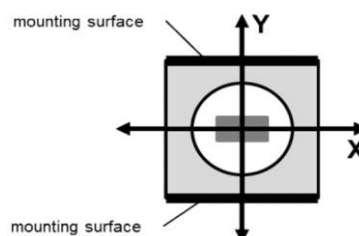
а)



б)

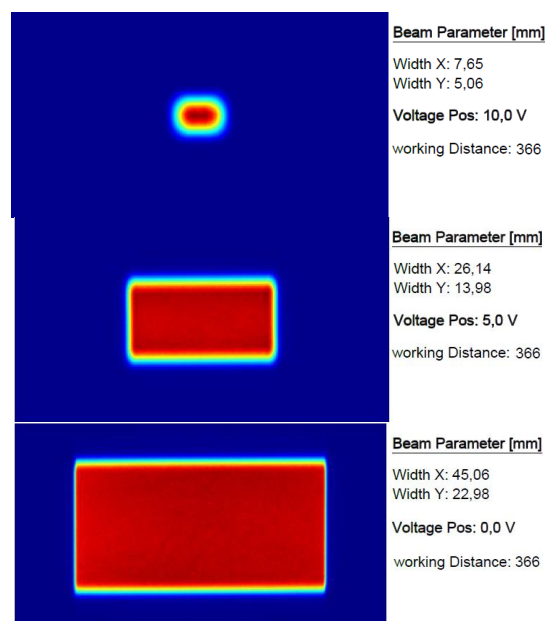
Фиг. 3. Изглед на изградената защитна „клетка“ на система за лазерно закаляване на сложни 3Д повърхнини

Основното предимство на използваната лазерна глава е възможността за прецизно регулиране ширината на лазерното петно, което позволява по-ефективно и с по-висока степен на функционалност да се извършва лазерната обработка на повърхнините. Управлението на ширината на петното се осъществява аналогово с промяна напрежение в диапазона от 0 до 10V по двете оси X и Y, като съответно промяната на размерите на фокусирувания лъч става спрямо оста на оптичната система на лазерната глава.



Фиг. 4. Разположение на петното на лазерния лъч спрямо лазерната глава

На фиг. 5 е показано изменението на площта на лазерното петно при различни входни управляващи напрежения.



Фиг. 5. Големина на петното при различни входни управляващи напрежения

Съгласуването на работата на лазерната глава с индустриалния робот по отношение на задаване на петното на лазерния лъч се извършва посредством аналогови изходи от контролера на индустриалния робот. Чрез тях фокусирането на лазерния лъч се регулира плавно в диапазона от (5,5 x 8) mm до (22 x 43) mm, независимо по двете оси X и Y, според предварително съставена програма.

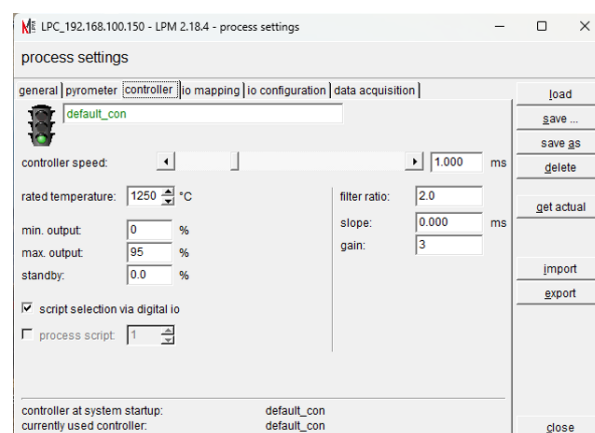
За прецизно регулиране температурата на закаляваната повърхност на обработвания детайл се използва пирометър, интегриран в корпуса на лазерната глава. Той измерва прецизно температурата и подава обратна връзка към контролера служеща за регулиране на изходящата мощност на лазерния източник.

За управление на технологичния процес закаляване се използва софтуерния продукт Lascon Process Manager. Приложението предлага интерфейс за настройване на параметрите на процеса закаляване - работна температура на закаляване на детайла, събиране и обработване на данни от процеса, както и пускането на така наречения пилотен лазер – излъчване във видим спектър, безопасен за оператор, чрез който предварително се настройва ширината на лазерното петно и неговото местоположение – фиг. 6 и фиг. 7.

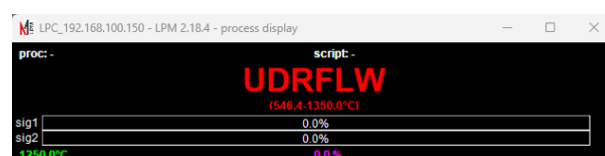
Софтуерния продукт Lascon Process Manager позволява запис на технологичния процес по време, зададена и действителна температура и изходяща мощност на лазерния източник. Освен това данните могат да се използват в графичен и табличен вид – фиг. 8. Това позволява анализ в следствие на процеса, необходимата температура и мощност при закаляване на различен по геометрия и материал детайли.

Задаването на различна ширина на петното на лазерния лъч е технологичен параметър за закаляването, свързан както с топло-физичните показатели на обработва-

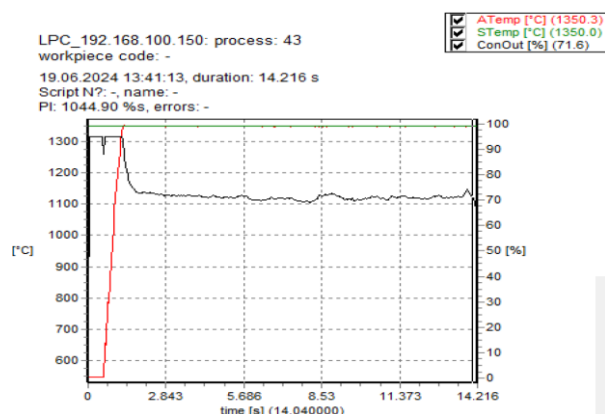
ния материал, така и с бързодействието при обработка.



Фиг. 6. Основен изглед на софтуер Lascon Process Manager за настройка на параметрите на оптичния пирометър



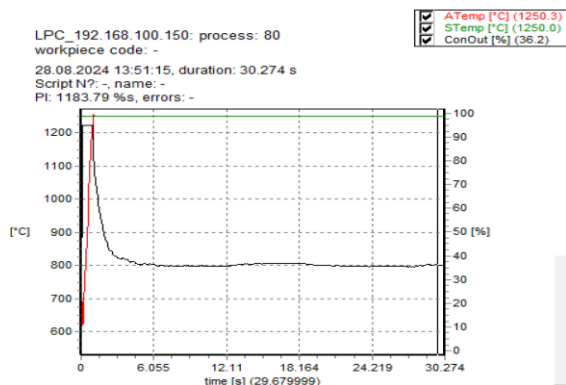
Фиг. 7. Прозорец за данни в реално време по време на технологичния процес



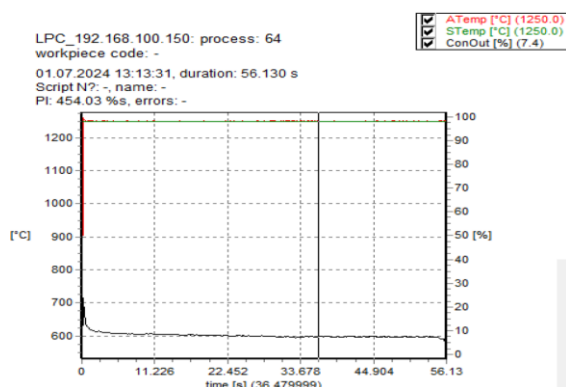
Фиг. 8. Диаграма на технологичния процес по време, изходяща мощност и температура при ширина на петното (14x26)mm

Широчината на петното спомага за обработката на често трудно-достъпни места при детайли със комплексна форма, напр. малогабаритни детайли или повърхнини, тесни технологични отвори, зъбни

колела с малък модул. Задаването на различно по ширина петно влияе на изходната мощност на лазерния източник така че да се поддържа равномерна плътност на мощността. На фиг. 8, 9 и 10 е показана големината на изходната мощност при еднаква температура на закаляване (1250°C).



Фиг. 9. Диаграма на процеса на закаляване при ширина на петното (14x26)mm



Фиг. 10. Диаграма на процеса на закаляване при ширина на петното (8x5,5)mm

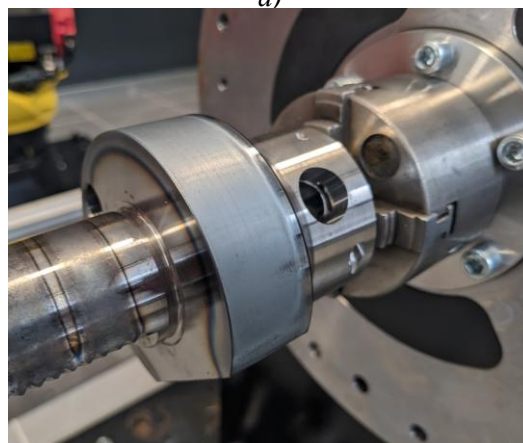
От получените диаграми на различните процеси се вижда увеличаването на изходната мощност при по-голяма площ на петното на лазерния лъч, както и увеличаване на времето за работа на лазерната глава за покриване на идентична площ, тоест движение с по-ниска скорост.

Разработена технология предоставя възможност за термична обработка на различни части от даден детайл, като се задават различна скорост на движение и температура на закаляване, което води до различна дълбочина и твърдост на закаления слой. На фиг. 11 е показан външния вид на

детайл с различни зони на закаляване. На фиг. 12 са показани диаграмите на процеса, като се вижда разликата в мощността, температурните зони и разпределиението на температурата при изпълнение на процеса.



а)

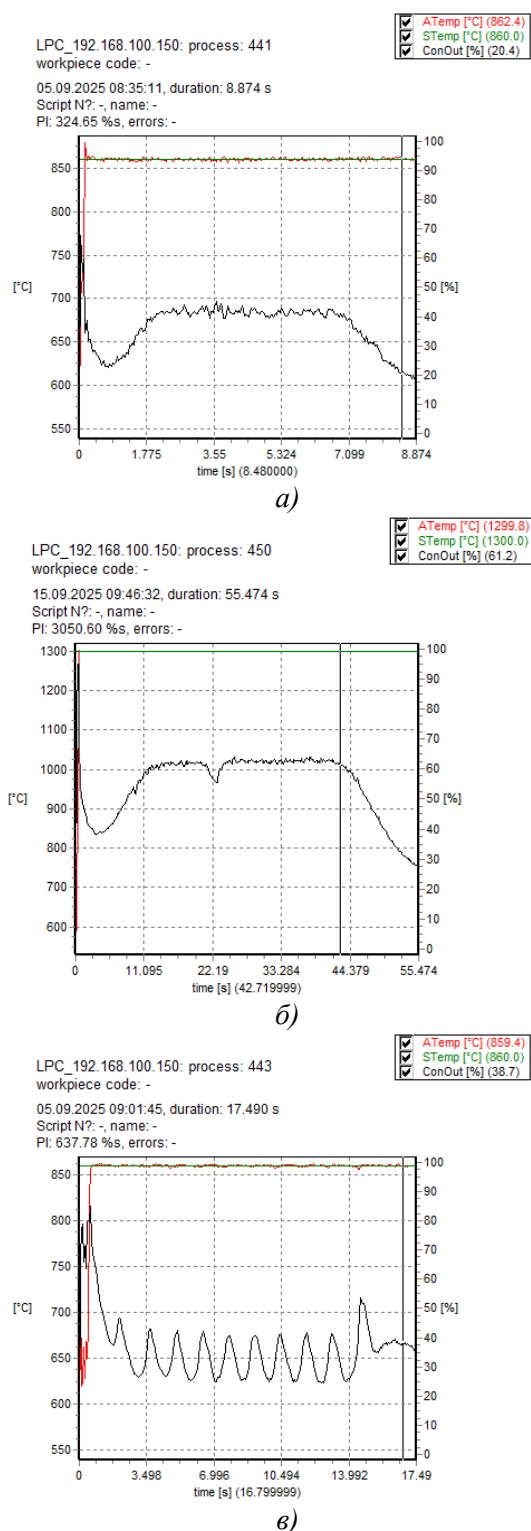


б)



в)

Фиг. 11. Зони на закаляване на детайл с различна температура и ширина на лазерното петно



Фиг. 12. Диаграми на процеса на закаляване при нагряване на детайла от фиг. 11 при различна температура и ширина на лазерното петно

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработената система представлява иновативно и енергийно ефективно решение за индустриални приложения в областта на машиностроенето, автомобилостроенето и сродни производства, където се изисква повишена износоустойчивост и удължен експлоатационен живот на детайлите. Комбинирането на роботизиран позициониращ модул с лазерна сканираща глава и измервателен модул с прецизно регулиране на температурата посредством пирометър осигурява прецизност, повторимост и висока точност на процеса. Възможността за динамично изменение на параметрите на обработка (ширина на петното, температура, скорост на движение) прави системата гъвкава и адаптивна спрямо различни материали и технологични изисквания. Получените експериментални резултати потвърждават, че разработената система позволява формиране на закалени слоеве с висока твърдост и контролирана дълбочина, без риск от прегряване или недогриване на материала.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

- [1] www.laserline.com/en/int/ldmseries/
- [2] www.laserline.com/en-int/otz-series/
- [3] www.mergenthaler-laser.com/en/hardening7
- [4] www2.fanuc.eu/uk/en/robots/robot-filter-page/m-20-series/m-20id-35
- [5] www.fanuc.eu/il/en/robots/accessories/robot-motion/positioners



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ТЕМПЕРАТУРНО-ИНДУЦИРАНО ОБРАЗУВАНЕ НА БИКОНТИНУАЛНА ФАЗА: CRYO-ТЕМ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И КАН- ХИЛИАРД ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Михаил Георгиев^{1,2,*}, Любен Михайлов³, Евелина Василева³

¹ Катедра „Инженерна химия и фармацевтично инженерство“, Факултет по химия и фармация,
Софийски университет „Св. Климент Охридски“, София 1164, България

² Център за компетентност „Интелигентна мехатроника, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“,
София 1164, България

³ Катедра „Приложна неорганична химия“, Факултет по химия и фармация,
Софийски университет „Св. Климент Охридски“, София 1164, България

*Автор за кореспонденция: mtg@lcpe.uni-sofia.bg

TEMPERATURE-INDUCED FORMATION OF A BICONTINUOUS PHASE: CRYO-TEM VISUALIZATION AND CAHN-HILLIARD INTERPRETATION

Mihail Georgiev^{1,2,*}, Lyuben Mihaylov³, Evelina Vasileva³

¹ Department of Chemical and Pharmaceutical Engineering, Faculty of Chemistry and Pharmacy,
Sofia University, Sofia 1164, Bulgaria

² CoC “Smart Mechatronics, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies”, Sofia 1164, Bulgaria

³ Department of Applied Inorganic Chemistry, Faculty of Chemistry and Pharmacy,
Sofia University, Sofia 1164, Bulgaria

*Corresponding author: mtg@lcpe.uni-sofia.bg

Abstract

Cryogenic transmission electron microscopy (Cryo-TEM) provides direct visualization of bicontinuous sponge (L_3) phases, where a surfactant bilayer meanders through space, dividing solvent into two continuous domains. Temperature increase destabilizes lamellar order by lowering the bending rigidity and driving the Gaussian modulus toward values that favor handle formation. We captured this transition as the loss of layered registry and the emergence of a labyrinthine bilayer network rich in saddle regions. A Cahn-Hilliard-type phase-field model reproduces these features: small shifts in the free-energy landscape and interfacial penalty are sufficient to convert stripe-like lamellae into bicontinuous structures. This synergy between imaging and modeling highlights how thermal fluctuations push membranes into topologies inaccessible at lower temperatures, offering a predictive framework for designing temperature-responsive surfactant systems.

Keywords: Cryo-TEM; Sponge phase; Cahn–Hilliard phase-field; Bicontinuous phase.

1. INTRODUCTION

Bicontinuous sponge (L_3) phases occupy a distinctive place in soft matter science. They are formed when a surfactant bilayer folds into a

highly connected labyrinth, partitioning solvent into two interpenetrating but disconnected domains. Unlike lamellar phases, which preserve

long-range positional order, sponge phases are globally isotropic yet microscopically structured. Their unusual topology underlies applications ranging from drug solubilization to templating of nanostructured materials [1,2].

The stability of such bicontinuous phases reflects a balance between curvature elasticity and thermal fluctuations. In the Helfrich framework, the areal free energy of a bilayer is expressed as:

$$f = \frac{k_c}{2}(2H - C_0)^2 + \bar{k}K \quad (1)$$

where k_c is the bending rigidity, C_0 the spontaneous curvature, and $\bar{k}$ the Gaussian modulus [3]. Lamellar stacks are favored when k_c is large and $\bar{k}$ negative, penalizing topology changes. By contrast, sponge phases emerge when heating reduces k_c and drives $\bar{k}$ toward zero or positive values, lowering the barrier to pore formation and bilayer connectivity [4,5].

While reciprocal-space techniques such as small-angle scattering provide statistical signatures of this transition, they cannot directly capture the real-space connectivity. Cryogenic transmission electron microscopy (Cryo-TEM) has recently enabled direct visualization of sponge bilayers as saddle-rich, multiply connected networks, making it possible to distinguish genuine L_3 morphology from perforated lamellae or multilamellar vesicles [6,7].

Alongside experimental advances, phase-field modeling offers a complementary conceptual framework. The Cahn–Hilliard equation, originally introduced to describe spinodal decomposition [8], can be extended with bilayer-specific free-energy terms to generate diffuse interfaces that reproduce lamellar and bicontinuous morphologies [9,10]. This formalism naturally accommodates topological transitions, such as handle formation, that are difficult to treat in sharp-interface models.

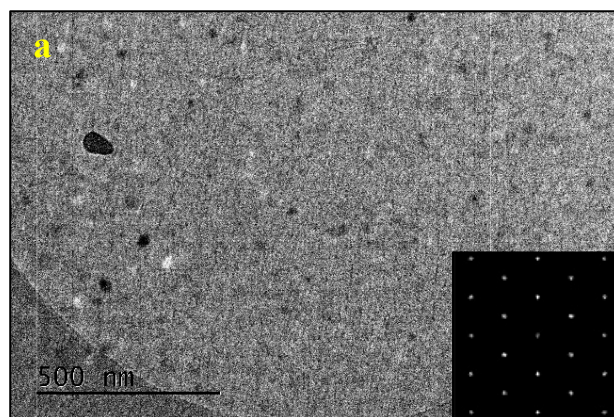
The present study combines Cryo-TEM imaging with a Cahn–Hilliard interpretation of temperature-induced phase transitions in surfactant bilayers. We focus on the lamellar-to-sponge transformation, demonstrating how direct visualization and diffuse-interface modeling converge to explain the role of thermal softening in generating bicontinuous connectivity.

2. RESULTS AND DISCUSSION

Samples were prepared following the standard protocol described by Georgiev et al. [11].

2.1 Temperature-driven morphological changes observed by Cryo-TEM

At lower temperatures the surfactant bilayers arrange in lamellar stacks, clearly visible in Cryo-TEM micrographs as parallel density bands with long-range registry. Upon heating, this order is lost: the images reveal a bicontinuous labyrinth where bilayers curve through space and form saddle-shaped passages. The disappearance of parallel alignment and the emergence of multiply connected motifs mark the transformation into a sponge (L_3) morphology. Fast Fourier transforms (FFTs) of the images support this distinction, with sharp lamellar reflections at low temperature giving way to a diffuse ring at higher temperature, corresponding to a characteristic mesh size in the tens of nanometers.



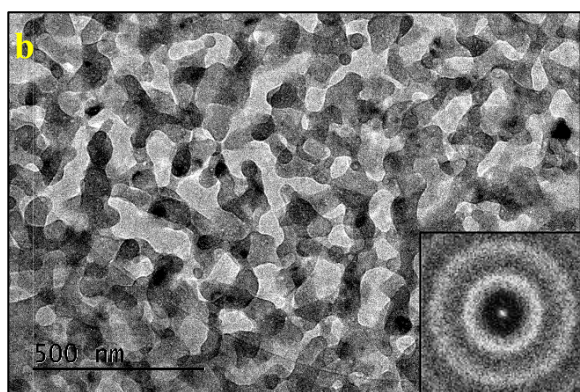


Fig. 1. Cryo-TEM images of surfactant bilayers at two temperatures. (a) Lamellar morphology with parallel registry ($T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$). (b) Sponge morphology with bicontinuous connectivity ($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$). Insets: FFTs showing the disappearance of lamellar reflections and the appearance of a diffuse ring (illustrative)[12]. Scale bars: 500 nm.

2.2 Cahn–Hilliard phase-field interpretation

The lamellar–sponge transition can be reproduced within a diffuse-interface framework. In the Cahn–Hilliard formulation, an order parameter $\phi(\mathbf{r}, t)$ distinguishes solvent domains, while the free energy includes both bulk and gradient terms:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \phi}{\partial t} &= \nabla \cdot (M \nabla \mu) \\ \mu &= \frac{\delta F}{\delta \phi} \\ F[\phi] &= \int \left[f(\phi) + \frac{\kappa}{2} |\nabla \phi|^2 + \lambda (\nabla^2 \phi)^2 \right] dV\end{aligned}\quad (2)$$

Here, κ penalizes interfaces, while λ selects bilayer-type structures. Reducing κ mimics the effect of heating, which lowers the bilayer bending modulus and softens interfaces. Simulations show that under these conditions, stripe-like lamellae destabilize and reorganize into bicontinuous labyrinths. The transition occurs through handle formation, a process naturally allowed in the phase-field framework but difficult in sharp-interface models.

The order parameter $\phi(\mathbf{r})$ reveals how gradual softening of the system destabilizes lamellae and enables bicontinuous connectivity,

mirroring the morphological transition observed in experiments.

2.3 Mechanistic picture

At lower temperature, the Cryo-TEM images (Fig. 1a) show parallel, registry-preserving fringes characteristic of lamellae. This morphology reflects a regime with high k_c and negative $\bar{k}$: the membrane pays a large energy to bend or nucleate passages, so it minimizes curvature by stacking into nearly flat layers (small $|H|$ and $K \approx 0$ almost everywhere). Upon heating, lamellar registry is lost and the micrographs display a labyrinth of saddle regions (Fig. 1b). These saddles are the real-space fingerprint of negative Gaussian curvature ($K < 0$), i.e., handles and necks that thread the bilayer into a bicontinuous network (L_3). Mechanically, this is exactly the scenario where k_c has decreased and $\bar{k}$ has shifted toward values that no longer penalize connectivity. The FFT insets reinforce the picture: sharp lamellar reflections at low T give way to a diffuse ring at higher T , consistent with the emergence of a characteristic mesh size ξ in the bicontinuous state. In practice, ξ is set by a competition between bending costs (via k_c) and an effective interfacial penalty; larger thermal softening tends to increase ξ (coarser networks), whereas residual constraints (e.g., hydration, additives) can pin ξ at smaller values.

The phase-field simulations (Fig. 2) reproduce these morphological regimes by tuning a single control parameter $\mathbf{r}$ that plays the role of an effective temperature/softening knob. More negative $\mathbf{r}$ yields stripe/lamellar patterns, numerical analogs of Fig. 1a, because the model's gradient and higher-order penalties suppress handle formation. As $\mathbf{r}$ is increased, stripes destabilize via handle nucleation and coalescence into a bicontinuous labyrinth (Fig. 2b), mirroring the sponge morphology in Fig. 1b. Near $\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{0}$ the amplitude weakens (Fig. 2c), consistent with a softened interface where long-range

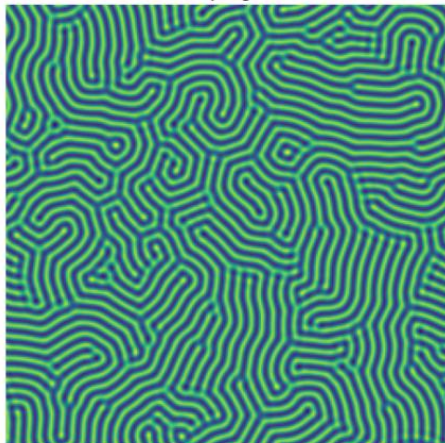
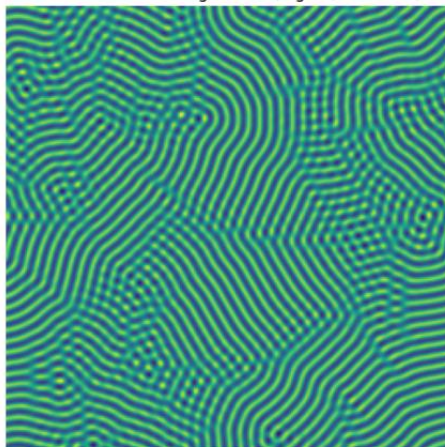
State B: Bicontinuous / sponge-like (mid T, $r = -0.40$)State A: Lamellar / stripe-like (low T, $r = -0.65$)State C: Near-homogeneous (high T, $r = -0.05$)

Fig. 2. Two-dimensional phase-field simulations of the conserved Swift–Hohenberg equation illustrate temperature-induced transitions in surfactant bilayer morphology. (a) Stripe-like (lamellar) state at low effective temperature ($r = -0.65$), (b) Bicontinuous “sponge”-like state at intermediate temperature ($r = -0.40$), (c) Weakly modulated, near-homogeneous state at high temperature ($r = -0.05$).

order is absent and connectivity is easily reconfigured. Topologically, this progression corresponds to an increase in genus (number of handles) and a more negative Euler characteristic, the same topological signature implied by the saddle richness in the Cryo-TEM. Thus, the agreement is not merely visual: the simulations encode the same mechanical trade-offs as the membrane (bending vs. interface vs. topology) and the transition pathway (stripe breakup $\rightarrow$ neck formation $\rightarrow$ networking) is the algorithmic counterpart of what the microscope reveals.

3. CONCLUSIONS

Temperature acts as a clean control parameter for topology in surfactant bilayers. Cryo-TEM directly reveals a lamellar-to-sponge transformation as heating disrupts layer registry and generates a saddle-rich, bicontinuous network. A minimal phase-field (Cahn–Hilliard with higher-order interfacial penalty) reproduces this pathway: modest shifts in the control parameter destabilize stripe-like lamellae and yield labyrinthine connectivity via handle formation.

Taken together, the real-space imaging and the diffuse-interface model provide a compact, predictive framework in which thermal softening—interpretable as reductions in effective bending rigidity and a shift of the Gaussian modulus—lowers the barrier to topological change. This framework explains why small thermal nudges produce large morphological consequences and offers practical levers for design: tune temperature to set connectivity and mesh size, and use phase-field simulations to pre-screen parameter space before formulation. Future work should quantify the temperature-dependence of the effective elastic moduli, extend to 3D reconstructions (e.g., cryo-electron tomography), and couple the model to transport/rheology to link morphology with function.



Continuation. As a next step, we will extend the structural readout to the liquid–air interface using imaging ellipsometry (IMME) to extract independent parameters, effective optical thickness, refractive-index contrast (Δn), surface coverage, and lateral domain statistics, thereby cross-validating and tightening the Cryo-TEM/phase-field picture [13].

Funding:

European Regional Development Fund under the Operational Program “Research, Innovation and Digitalization for Smart Transformation 2021-2027”:

CoC “Smart Mechatronic, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies”

Project BG16RFPR002-1.014-0005

and “National Centre of Excellence Mechatronics and Clean Technologies”

Project BG16RFPR002-1.014-0006

REFERENCES

- [1] J.M. Seddon, R.H. Templer, Polymorphism of Lipid-Water Systems, in: 1995: pp. 97–160. [https://doi.org/10.1016/S1383-8121\(06\)80020-5](https://doi.org/10.1016/S1383-8121(06)80020-5).
- [2] K. Larsson, Cubic lipid-water phases: structures and biomembrane aspects, J Phys Chem 93 (1989) 7304–7314. <https://doi.org/10.1021/j100358a010>.
- [3] W. Helfrich, Elastic Properties of Lipid Bilayers: Theory and Possible Experiments, Zeitschrift Für Naturforschung C 28 (1973) 693–703. <https://doi.org/10.1515/znc-1973-11-1209>.
- [4] R. Podgornik, Statistical thermodynamics of surfaces, interfaces, and membranes, J Stat Phys 78 (1995) 1175–1177. <https://doi.org/10.1007/BF02183712>.
- [5] M.E. Cates, S.T. Milner, Role of shear in the isotropic-to-lamellar transition, Phys Rev Lett 62 (1989) 1856–1859. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.62.1856>.
- [6] J.P.F. Lagerwall, G. Scalia, A new era for liquid crystal research: Applications of liquid crystals in soft matter nano-, bio- and microtechnology, Current Applied Physics 12 (2012) 1387–1412. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2012.03.019>.
- [7] I. Davidovich, L. Issman, C. de Paula, I. Ben-Barak, Y. Talmon, A cryogenic-electron microscopy study of the one-phase corridor in the phase diagram of a nonionic surfactant-based microemulsion system, Colloid Polym Sci 293 (2015) 3189–3197. <https://doi.org/10.1007/s00396-015-3773-7>.
- [8] J.W. Cahn, J.E. Hilliard, Free Energy of a Nonuniform System. I. Interfacial Free Energy, J Chem Phys 28 (1958) 258–267. <https://doi.org/10.1063/1.1744102>.
- [9] C.M. Elliott, B. Stinner, Modeling and computation of two phase geometric biomembranes using surface finite elements, J Comput Phys 229 (2010) 6585–6612. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2010.05.014>.
- [10] H. Garcke, M. Rumpf, U. Weikard, The Cahn-Hilliard equation with elasticity-finite element approximation and qualitative studies, Interfaces and Free Boundaries, Mathematical Analysis, Computation and Applications 3 (2001) 101–118. <https://doi.org/10.4171/ifb/34>.
- [11] M.T. Georgiev, L.A. Aleksova, P.A. Kralchevsky, K.D. Danov, Phase separation of saturated micellar network and its potential applications for nanoemulsification, Colloids Surf A Physicochem Eng Asp 607 (2020) 125487. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125487>.
- [12] I.W. Hamley, V. Castelletto, O.O. Mykhaylyk, Z. Yang, R.P. May, K.S. Lyakhova, G.J.A. Sevink, A. V. Zvelindovsky, Mechanism of the Transition between Lamellar and Gyroid Phases Formed by a Diblock Copolymer in Aqueous Solution, Langmuir 20 (2004) 10785–10790. <https://doi.org/10.1021/la0484927>.
- [13] M. Georgiev, B. Konstantinov, K. Marinova, J. Petkov, K. Danov, Investigation of cationic surfactants adsorption behaviour on silicon wafers using imaging ellipsometry, Journal of the Technical University of Gabrovo 66 (2023) 38–42. <https://doi.org/10.62853/WVFB5121>.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ЛАБОРАТОРИЯ ПО ИНОВАТИВНИ НАНОСТРУКТУРИРАНИ МАТЕРИАЛИ – НАУКА, ТЕХНОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВИ

LABORATORY OF INNOVATIVE NANOSTRUCTURED MATERIALS – SCIENCE, TECHNOLOGY, AND FUTURE PERSPECTIVES

Tsveta Sarafska, Zlatina Zlatanova, Tony Spassov

*Faculty of Chemistry and Pharmacy, Sofia University “St. Kliment Ohridski”
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"*

Abstract

In recent years, the development of innovative nanostructured materials has attracted considerable attention due to their unique properties and broad application potential in pharmaceuticals, catalysis, environmental protection, and biomedicine. This study focuses on the synthesis and characterization of inclusion complexes based on β -cyclodextrin, chitosan-based biopolymers, and nano- and mesoporous catalytic systems. Advanced analytical techniques such as differential thermal analysis (DTA), scanning electron microscopy (SEM), and Brunauer–Emmett–Teller (BET) surface analysis were employed to obtain comprehensive information on thermal stability, morphology, porosity, and surface area. SEM provided high-resolution images of morphology, pore size distribution, and microstructural changes during synthesis and modification, while DTA enabled precise evaluation of thermal transitions, degradation processes, and host–guest interactions in inclusion complexes. BET analysis delivered quantitative data on specific surface area and pore distribution, crucial for understanding adsorption capacity, catalytic activity, and functional optimization. The combined use of these methods allows a reliable correlation between structure and properties, which is fundamental for the targeted design of hybrid functional materials.

Keywords: cyclodextrins, inclusion complexes, chitosan, nano- and mesoporous materials, catalysts, thermal analysis (DTA/TGA), scanning electron microscopy (SEM), BET surface analysis.

ВЪВЕДЕНИЕ

През последните десетилетия циклодекстрините и техните комплекси на включване се превърнаха в обект на интензивни изследвания, благодарение на уникалната си структура и способността да образуват стабилни съединения с разнообразни гост-молекули – алкохоли, липиди, лекарствени вещества и газове. Получените комплекси показват широк спектър от приложения: във фармацията – за повишаване на бионаличността и стабилността на активните вещества; в хранителната и козметичната

индустрия – за маскиране на вкус и мирис; в екологията – за улавяне на замърсители и токсични съединения.

Традиционно синтезирани чрез хидротермални методи, тези комплекси често изискват продължително време и високи енергийни разходи. Затова механохимичният подход набира популярност като по-екологична и ефективна алтернатива, осигуряваща контрол върху структурните характеристики и по-добри условия за индустриално приложение.



Прецизното им охарактеризиране е от ключово значение, като диференциалният термичен анализ (DTA) и сканиращата електронна микроскопия (SEM) заемат централно място. DTA позволява да се проследят термичните преходи и стабилността на комплексите, докато SEM разкрива морфологични и микроструктурни промени, настъпващи при образуването им. Съвместното използване на двата метода осигурява интегриран подход за разбиране на зависимостите „структура–свойства“, както и за приложението на тези материали.

Наред с циклодекстрин-базираните системи, съвременните изследвания са насочени и към нано- и мезопорести материали с висока каталитична активност. Те намират приложение в разграждане на органични замърсители, пречистване на води и катализ на различни химични реакции. Допълнителна функционализация се постига чрез модифициране с хитозан – биополимер с висока биосъвместимост и отлични адсорбционни свойства. Такива хибридни материали съчетават предимствата на органичната и неорганичната компонента, разширявайки възможностите за приложение във фармацията, биомедицината и екологичните технологии. И тук DTA и SEM се явяват незаменими инструменти за оценка на стабилността, порьозността и взаимодействията в системата.

По този начин, комбинацията от комплекси на включване, нано- и мезопорести материали и хитозан-базирани хибриди очертава перспективен път за създаване на ново поколение функционални материали с ключово значение за науката и индустрията.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Сканиращата електронна микроскопия (SEM) е сред най-важните методи за охарактеризиране на наноструктурирани материали, тъй като предоставя изображения с

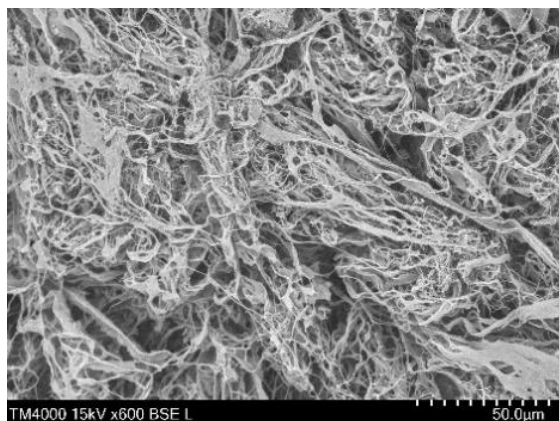
висока разделителна способност на тяхната морфология и микроструктура. Чрез SEM могат да се проследят размерът и формата на частиците, степента и разпределението на порите, както и настъпилите структурни промени при процеси като синтез, модификация или образуване на комплекси на включване. В изследванията на нано- и мезопорести системи, циклодекстрин - базирани материали и хибриди с хитозан, SEM осигурява директни визуални доказателства за взаимодействията между компонентите и структурната реорганизация на повърхността. Това го прави незаменим инструмент за установяване на връзката между структура и функционални свойства, от които зависят каталитичната активност, адсорбционният капацитет и приложенията на материалите. В лабораторията по „Иновативни наноструктурирани материали“ по настоящия проект се използва HITACHI TM4000 (Фиг. 1).



Фиг. 1. Сканиращ електронен микроскоп
HITACHI TM4000

Сканиращият електронен микроскоп Hitachi TM4000 е настолен уред от ново поколение, съчетаващ компактност и висока аналитична мощност. Той работи в диапазон от 5 до 20 kV и позволява образуване на изображения чрез BSE, SE и комбиниран режим, осигурявайки детайлен контраст по морфология и състав. Микроскопът поддържа стандартен и нисковакуумен режим,

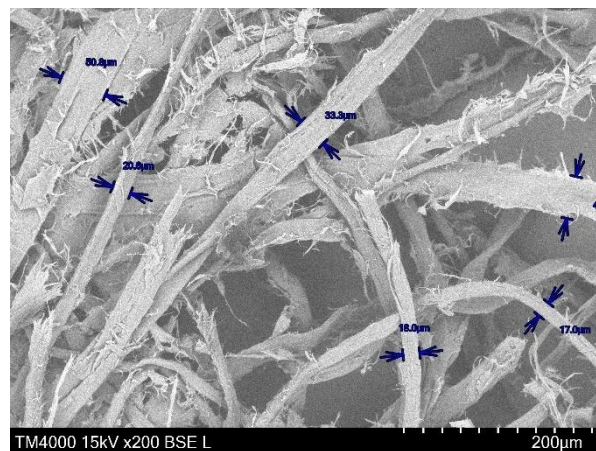
както и функция за намаляване на заряд, което позволява наблюдение на непроводими проби без необходимост от златно покритие. Максималният размер на пробата достига до около 80 mm в диаметър и 50 mm височина, като степента на увеличение варира от 10× до 100 000×. Вградените 4-сегментни детектори за обратно разсеяни електрони и опционалният SE детектор в нисък вакуум дават възможност за прецизно изобразяване на порести, композитни и наноструктурирани материали. Компактният дизайн и бързата подготовка на пробите правят TM4000 изключително подходящ както за рутинни наблюдения и обучение, така и за детайлни морфологични изследвания на материали с разнообразен произход. В лабораторията по „Иновативни наноструктурирани материали“ се изследват различни обекти като биополимери - хитозан (Фиг. 2).



Фиг. 2. Електронна микрография на хитозан

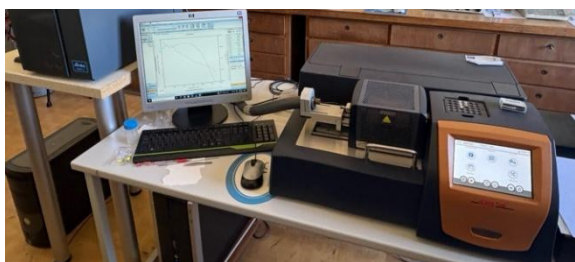
С помощта на **Hitachi TM4000** могат да се получават изображения с висока разделителна способност, които позволяват измерване на размерите и разпределението на порите, както и определяне на дебелината на различни образци. По този начин TM4000 е ценен инструмент за количествено и качествено охарактеризиране на поръзността, дебелината на слоеве и струк-

турните изменения в различни материали (Фиг. 3).



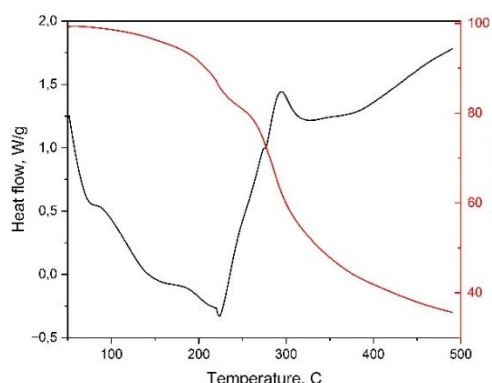
Фиг. 3. Определяне размер на хитозанови нишки

Апаратът SDT 650 (TA Instruments) съчетава диференциален термичен анализ (DTA) и термогравиметричен анализ (TGA), което позволява едновременно регистриране на топлинни ефекти и промени в масата на пробите в широк температурен диапазон до 1500 °C. Тази комбинация го прави изключително подходящ за изследване на комплекси на включване, където може да се установят характерни термични преходи и стабилност на взаимодействията „домакин – гост“, както и за анализ на биополимери като хитозан, при които се проследяват процеси на отделяне на вода, структурни модификации и термично разграждане. Освен това апаратът е ценен инструмент за охарактеризиране на катализатори, като предоставя информация за тяхната стабилност, фазови преходи и реакционна активност. Благодарение на високата си чувствителност и прецизност, SDT 650 намира широко приложение както във фундаментални, така и в приложни изследвания на наноструктурирани и хибридни материали.



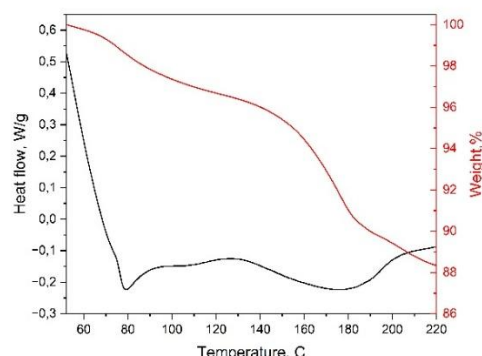
Фиг. 4. Диференциален термичен анализатор
SDT 650 - TA Instruments

Диференциалният термичен анализ (DTA) е широко използван метод за охарактеризиране на хитозан и неговите производни, тъй като позволява детайлно проследяване на топлинните ефекти, свързани с промените в неговата структура и стабилност. При нагряване обикновено се наблюдават няколко характерни прехода: ендотермичен ефект, свързан с дехидратацията на материала (загуба на адсорбирана вода), последван от екзотермични ефекти, които отразяват термичното разграждане и разпад на полимерната верига. DTA дава ценна информация за чистотата на пробата, степента на деацетилиране и влиянието на модификации като включване на функционални групи, образуване на комплекси на включване или смесване с неорганични компоненти. Тези данни са от съществено значение при разработването на хибридни материали на базата на хитозан, тъй като позволяват оценка на термичната им устойчивост и пригодност за приложение във фармацевтични, биомедицински и екологични технологии (Фиг. 5).



Фиг. 5. DTA DTA анализ на хитозан

Термичните методи предоставят съществена информация и при изследването на формирането и стабилността на комплекси на включване между β -циклодекстрин и ибупрофен. Диференциалният термичен анализ (DTA) позволява да се сравнят термичните профили на отделните компоненти и на получения комплекс. За чистия ибупрофен е характерен ясно изразен ендотермичен пик, съответстващ на точката му на топене (около 75–78 °C), докато при β -циклодекстрин се наблюдават ефекти, свързани с дехидратация и последващо термично разграждане при по-високи температури (Фиг. 6). При получаване на комплекс на включване тези характерни пикове се променят – ендотермичният пик на ибупрофен отсъства, намалява или се измества, което е доказателство за включването на лекарствената молекула във вътрешната хидрофобна кухина на циклодекстрина. Тази промяна в термичното поведение служи като директен индикатор за успешното образуване на комплекс на включване. Освен това, изследването с DTA дава възможност да се оцени и стабилността на комплекса спрямо отделните компоненти, което е важно за неговото приложение във фармацевтичната практика. Чрез такива комплекси често се постига подобряване на разтворимостта и бионаличността на слабо разтворими лекарства като ибупрофен, както и маскиране на вкус или мирис, което разширява възможностите за разработване на нови лекарствени форми.



Фиг. 6. DTA анализ на комплекс на включване на ибупрофен в бета-циклодекстрин



Методът на Брунауер–Емет–Телър (ВЕТ) представлява класически подход за определяне на специфичната повърхност на твърди материали въз основа на адсорбция на газ. За разлика от теорията на Лангмюр, която описва монослойна адсорбция, ВЕТ теорията отчита многослойното разполагане на газови молекули върху повърхността на твърдото тяло. Този модел допуска адсорбция в безкрайно много слоеве, като се приема, че взаимодействието протича основно между съседни слоеве, а енталпията на адсорбция за първия слой е по-висока от тази на следващите. В практиката най-често се използва азот като сондиращ газ при температура 77 К, но възможни са и други адсорбати като аргон, въглероден диоксид или вода, което позволява изследване на материали в различни температурни и структурни режими.

ВЕТ анализът предоставя надеждна количествена информация за размерите и разпределението на порите, степента на порьозност и общата специфична повърхност на материалите. Този метод е особено ценен при охарактеризиране на активни въглероди, катализатори, адсорбенти и наноструктурирани системи, където повърхностните свойства са от ключово значение за функционалността. Чрез ВЕТ анализа могат да се сравняват материали с различен произход, да се проследяват ефектите от модификации и да се оптимизират свойства като адсорбционен капацитет и каталитична активност. Благодарение на своята универсалност и точност, ВЕТ методът е сред най-широко използваните техники за структурно-адсорбционни изследвания в науката за материалите.

Лабораторията по Иновативни наноструктурирани материали използва апарат на **Micromeritics 3Flex** за определяне на специфична повърхност, порьозност и изотерми на адсорбция по метода ВЕТ (Фиг.7)

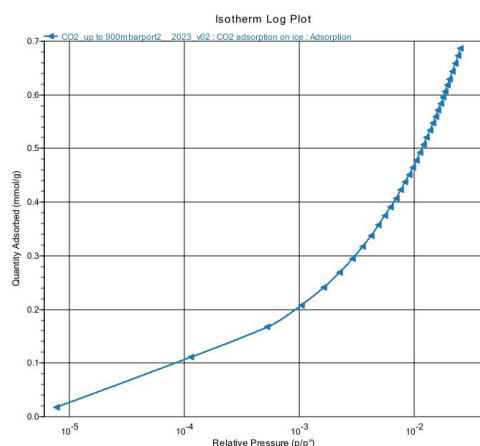


Фиг. 7. ВЕТ анализатор Micromeritics 3Flex

ВЕТ методът е широко приложим при охарактеризиране на материали с различен произход и предназначение, включително биополимери като хитозан, катализатори и комплекси на включване. При хитозана определянето на специфичната повърхност и порьозността е ключово за разбирането на неговата адсорбционна способност спрямо замърсители или лекарствени молекули, както и за оптимизацията на модифицирани или композитни форми. При катализаторите ВЕТ анализът позволява да се установи активната повърхност и разпределението на порите, което пряко влияе върху каталитичната активност и селективност на материала (Фиг. 8). В областта на комплексите на включване, например циклодекстрин–гост системи, измерването на специфичната повърхност и наличието на мезоили микропори допринасят за по-доброто



разбиране на механизма на включване и за оценка на възможностите за съхранение и освобождаване на молекули. По този начин ВЕТ анализът предоставя надеждна количествена информация, която е от съществено значение за целенасочено разработване и оптимизиране на функционални материали.



Фиг. 8. ВЕТ анализ на порьозен материал

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведените изследвания показват, че съчетаването на циклодекстрин-базирани комплекси на включване, хитозан и нано-/мезопорести материали е перспективен подход за създаване на функционални системи с широко приложение във фармацията, биомедицината, катализа и екологичните технологии. Ключова роля в този процес играе използването на съвременни аналитични методи, които осигуряват надеждна и допълваща се информация за свойствата на материалите. Сканиращата електронна микроскопия (SEM) предоставя високорезолуционни изображения за морфологията, размера и разпределението на порите, както и за настъпилите структурни промени при синтез и модификация. Диференциалният термичен анализ (DTA) дава

възможност за проследяване на термичната стабилност, преходите и взаимодействията „хост-гост“ в комплексите на включване, както и на процесите на дехидратация и разграждане при биополимери като хитозан. Методът на Брунауер–Емет–Телър (ВЕТ) предоставя количествени данни за специфичната повърхност и порьозността, които са критични за оценка на адсорбционния капацитет и каталитичната активност на изследваните материали. Комбинираното прилагане на тези методи позволява изграждането на пълна картина за структурата и свойствата на системите, което е фундаментална основа за целенасочено разработване и оптимизиране на ново поколение иновативни наноструктурирани материали.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Brunauer, S., Emmett, P. H., Teller, E. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society*, 1938, 60(2), 309–319.
- [2] Loftsson, T., Duchêne, D. Cyclodextrins and their pharmaceutical applications. *International Journal of Pharmaceutics*, 2007, 329(1–2), 1–11.
- [3] Szejtli, J. Introduction and general overview of cyclodextrin chemistry. *Chemical Reviews*, 1998, 98(5), 1743–1754.



- [4] Rinaudo, M. Chitin and chitosan: Properties and applications. *Progress in Polymer Science*, 2006, 31(7), 603–632.
- [5] Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., Sing, K. S. W. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 2015, 87(9–10), 1051–1069.
- [6] Rouquerol, F., Rouquerol, J., Sing, K., Llewellyn, P., Maurin, G. Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications. 2nd ed. Academic Press, 2014.
- [7] Barret, E. P., Joyner, L. G., Halenda, P. P. The determination of pore volume and area distributions in porous substances. *Journal of the American Chemical Society*, 1951, 73(1), 373–380.
- [8] TA Instruments. SDT 650 – Simultaneous DSC-TGA Instrument Brochure. New Castle, DE, USA: TA Instruments, 2015.
- [9] Hitachi High-Technologies Corporation. TM4000/TM4000Plus Tabletop Scanning Electron Microscope User Guide. Tokyo, Japan: Hitachi High-Tech, 2018.
- [10] Micromeritics Instrument Corporation. 3Flex Surface Characterization Analyzer: Product Brochure. Norcross, GA, USA: Micromeritics, 2020.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

СВЕТЛОТЕХНИЧЕСКИ ИЗМЕРВАНИЯ В АКРЕДИТИРАНА ЛАБОРАТОРИЯ КЪМ ЛАБОРАТОРЕН КОМПЛЕКС ЗА ИЗМЕРВАНЕ, ИЗПИТВАНЕ И КАЛИБРИРАНЕ ПРИ ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ- ГАБРОВО

LIGHTING MEASUREMENTS IN AN ACCREDITED LABORATORY OF THE MEASUREMENT, TESTING AND CALIBRATION LABORATORY COMPLEX AT TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO

Plamen Tsenkov Tsankov
Technical University of Gabrovo
plamen@tugab.bg

Ivaylo Petrov Stoyanov
Technical University of Gabrovo
istoyanov@tugab.bg

Hristo Todorov Ibrishimov
Technical University of Gabrovo
ico@tugab.bg

Milko Todorov Yovchev
Technical University of Gabrovo
myovchev@tugab.bg

Ivaylo Vasilev Lazarov
Technical University of Gabrovo
Iv_lazarov@tugab.bg

Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract

This paper reports photometric and colorimetric testing of lamps and luminaires performed in a BDS EN ISO/IEC 17025:2018 accredited lighting laboratory at the Technical University of Gabrovo. Statistical data are presented by technology type and application, along with histograms illustrating the distribution of luminous efficacy and correlated color temperature of tested LED lamps and luminaires.

Keywords: spectroradiometer; goniophotometer, luminaires, luminous efficacy, light distribution curves, correlated colour temperature, integrating sphere, accredited laboratory.

ВЪВЕДЕНИЕ

Бързото развитие и непрекъснато подобряване на полупроводниковите технологии за производство на светодиодни (LED) светлинни източници, разработването на различни устройства (драйверите)

за електрозахранване и управление, както и проектирането на различни иновативни оптични системи за преразпределение и насочване на светлинния поток, са предпоставка за създаване на иновативни енергийно ефективни осветители. Производи-



телите на осветители са задължени да обявяват техническите параметри на своите изделия. Това създава необходимост от квалифицирано измерване и изследване на техните фотометрични, цветови и електро-технически характеристики в специализирани светлотехнически лаборатории със съвременна измервателна апаратура.

През 2018 г. в Технически университет – Габрово е създаден Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“, в който е изградена най-съвременна научна инфраструктура, която допринася за развитието на връзката наука-бизнес за укрепване на конкурентоспособността на икономиката [4].

Към Центъра за компетентност е изградена лаборатория С7.4 „Екологични, енергоспестяващи и електромагнитно съвместими LED и ВЕИ компоненти и технологии“. Основните дейности в лабораторията са:

- измерване на електроенергийни, фотометрични и цветови характеристики и параметри на лампи и осветители за вътрешно, външно и улично приложение;
- измерване и мониторинг на характеристики на напрежението и показатели на качество на електрическата енергия в променливотокови храняващи мрежи и системи;
- измерване на волт-амперни характеристики и мониторинг на производителността на фотоволтаични (PV) модули и системи.

За улични и промишлени осветители, предлагани при обществени поръчки за държавни или общински проекти, се изискват протоколи от изпитвания на основните параметри и характеристики на осветителите в акредитирани лаборатории. Технически университет – Габрово подава искане до Изпълнителна агенция „Българска

служба за акредитация“ (ИА БСА) и на 23.07.2024 г. лабораторният комплекс получава сертификат за акредитация по БДС EN ISO/IEC 17025:2018 за 4-годишен период и светлотехническата лаборатория С7.4 издава сертифицирани протоколи от изпитване на лампи (светлинни източници), осветители и осветителни уредби.

В доклада се представят техническите възможности и резултати от изпитвания посредством гониофотометър и спектро-радиометър с интегрираща сфера в акредитираната светлотехническа лаборатория към Центъра за компетентност на LED осветители от различен вид и с различно приложение.

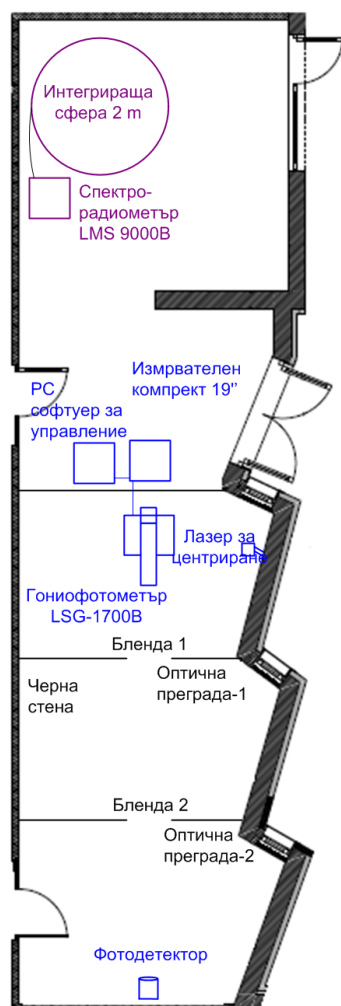
ИЗЛОЖЕНИЕ

В акредитираната лаборатория С7.4 „Екологични, енергоспестяващи и електромагнитно съвместими LED и ВЕИ компоненти и технологии“ се осъществяват:

- извършване на стопанска дейност с изпитване на светлотехнически и електро-технически характеристики на лампи, осветители и осветителни уредби и издаване на сертифицирани протоколи;
- извършване на научноизследователски дейности и публично представяне на резултатите с научни доклади в международни реферирани и индексирани научни конференции и списания с импакт фактор;
- провеждане на изследвания с учебни цели – лабораторни упражнения със студенти и докторанти и разработка на дипломни работи и дисертационни трудове в областта на светлинната техника и електроснабдяването.

Основната измервателна апаратура, с която се осъществява изпитването на лампи и осветители в лабораторията, е автоматизирани гониофотометър и спектро-радиометър с интегрираща сфера. На фиг. 1 е показана архитектурната основа (с изглед

отгоре) на светлотехническата лаборатория с позиционирането на гониофотометричната система и спектрометричната система с интегриращата сфера.

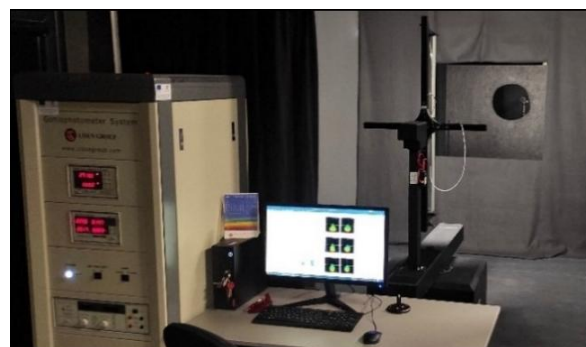


Фиг. 1. Архитектурна основа на акредитираната светлотехническа лаборатория с разположение на измервателните уреди

Лабораторията е разделена на две измервателни зони. В едната зона се разполагат компонентите на гониофотометричната система. В зоната без достъп до външна светлина са разположени ротационния гониофотометър, върху който се инсталират и електрозахранват изпитваните лампи и осветители, фотодетектор, двупозиционен лазер за оптично хоризонтално и вер-

тикално центриране спрямо фотодетектора и две оптични бленди. Разстоянието между гониофотометъра и фотодетектора е 8 m и се осигурява необходимата точност на фотометричните измервания [1,2]. Повърхнините в лабораторията са третирани с черно покритие. Измервателната апаратура към гониофотометъра, разположена в обособен комплект, и компютърната конфигурация със специализиран софтуер за управление на измервателните процеси, се намират извън зоната между гониофотометъра и фотодетектора, отделена с допълнителна черна преграда, в която има достъп до външна светлина (фиг. 1).

На фиг. 2 е показан външният вид на гониофотометричната система LSG-1700B, която се използва в лабораторията.



Фиг. 2. Фотометрични измервания на лампи и осветители с гониофотометър LSG-1700B

С инсталирания в лабораторията гониофотометър LSG-1700B се извършва измерване на светлинен поток Φ , интензитет на светлината I , светлоразпределителни криви (СРК), ъгъл на светлинния сноп и ъгъл на светлинното поле, степен на заслепяване, електрически ток, активна мощност, фактор на мощността, светоотдаване и определяне на класа на енергийната ефективност на лампи и осветители. Измерванията отговарят на международните и европейските методи и стандарти, и се провеждат при строго контролиране на параметрите на околната среда – относителна влажност

и температура на въздуха [1]. Максималните размери на изпитваните осветители при инсталирането им към гониофотометъра са 1600×550 mm. Основните технически характеристики на гониофотометричната система са представени в табл. 1.

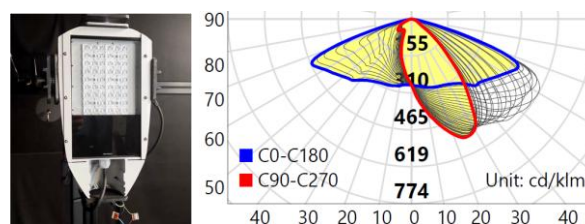
Табл. 1. Технически характеристики на гониофотометър LSG-1700B

Характеристика	Стойност/категория
Фотометричен клас, съгласно действащия DIN 5032-Част 7:	Клас А
Вид на измервателните оптични системи по CIE:	A- α , B- β , C- γ
Диапазон на изменение във фотометрична система C- γ :	$\gamma = \pm 180^\circ$
Точност на задаване на измервателния ъгъл (резолюция):	$\gamma \leq 0,5^\circ$
Генерирани файлови формати:	*.ldt и *.ies

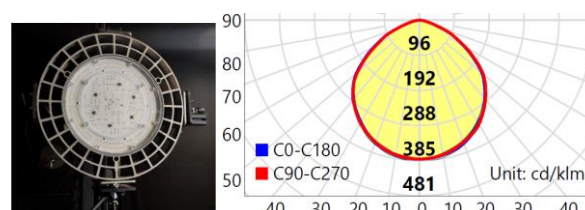
Калибрирането на гониофотометъра се извършва с еталонна лампа за интензитет на светлината, модел SLS-150W, с параметри: постоянно напрежение 30 V, ток 6,11 A, светлинен поток $\Phi = 4353,7 \text{ lm}$, интензитет на светлината $I = 379,6 \text{ cd}$ и корелирана цветна температура $T_c = 3195 \text{ K}$, за която периодично се издава свидетелство за калибриране.

Периодично се издават свидетелства за калибриране и за измервателните компоненти към гониофотометричната система – двойноканалния мултифотометър PM 400, цифровия измервателен уред за напрежение, електрически ток, активна мощност и фактор на мощността LS 2012 и измервателната ролетка.

На фиг. 3 са показани резултати от измерени с гониофотометър LSG-1700B в лабораторията CPK на два LED осветителя с различно приложение.



а) CPK на уличен LED осветител



б) CPK на индустриален LED осветител

Фиг. 3. Измерени CPK на LED осветители

Спектрорадиометърът LMS-9000B и интегриращата сфера, тип 4 π , с диаметър 2 m, показани на фиг. 4, са разположени в отделно обособено пространство, в което има достъп до външна светлина, тъй като сферата, в която се поставят изследваните лампи и осветители, се затваря плътно [4].



Фиг. 4. Светлотехнически измервания на лампи и осветители със спектрорадиометър LMS-9000B и сфера, тип 4 π , с диаметър 2 m

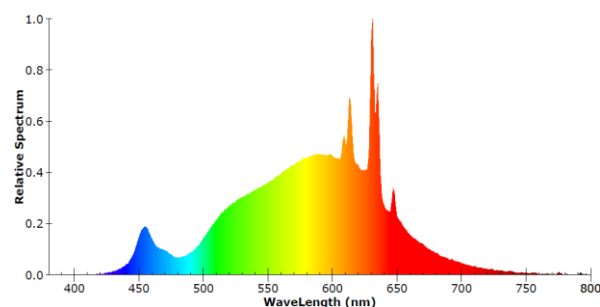
Със спектрорадиометъра LMS-9000B и интегриращата сфера в лабораторията се извършва измерване на светлинен поток Φ , спектрално разпределение на лъчистия

поток $\Phi_{e,\lambda}$ във видимия спектър (380 ÷ 800) nm, корелирана цветна температура T_{cp} , общ индекс на цветопрераждане R_a и частни индекси на цветопрераждане, върност на цвета R_f и индекс на наситеност R_g , координати на цветност x , y , доминантна λ_d и пикова λ_p дължина на вълната, фотосинтетична активна радиация (PAR), електрически ток, активна мощност, светоотдаване, фактор на мощността и хармонични съставлящи на тока и напрежението от 1-ви до 50-ти порядък. Измерването на видимия спектър и неговата интензивност със спектрорадиометъра позволява да се изчисляват част от показателите на опасната синя светлина – дефинираната в IEC 62468 тегловната функция на опасната синя светлина $B(\lambda)$ и ефективност на опасната синя светлина във видимия спектър $K_{B,V}$. Основните технически характеристики на спектрорадиометъра са дадени в табл. 2.

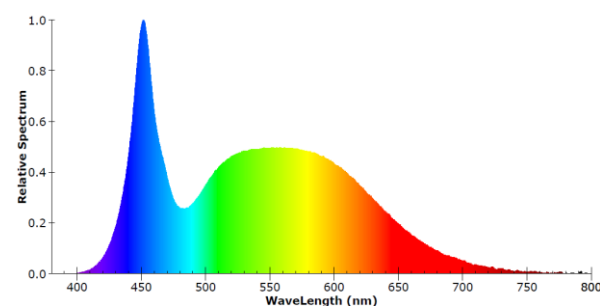
Табл. 2. Технически характеристики на спектрорадиометър LMS-9000B

Характеристика		Стойност
Спектрален диапазон на измерване, в nm:		$\lambda = 380 \div 800$
Спектрална точност в посочения вълнов обхват, в nm:		$\pm 0,3$
Относителна грешка за вълновия обхват, в %	< 0,015 (при 600 nm);	
	< 0,030 (при 435 nm)	
Точност на измерване на цветовите координати (Δx , Δy):		$\pm 0,002$
Диапазон на измерване на T_{cp} , в K:		1500 ÷ 100000
Време на интегриране:		0,1 ms ÷ 20 s

На фиг. 5 и 6 са показани резултати от измерено със спектрорадиометър LMS-9000B в лабораторията спектралното разпределение на лъчистия поток $\Phi_e(\lambda)$ във видимата област на два LED осветителя с различно приложение.



Фиг. 5. Спектър на LED осветител на жилищно осветление



Фиг. 6. Спектър на LED осветител на осветление на търговски обекти

В периода от началото на 2024 г. до август 2025 г. в лабораторията се извършва стопанска дейност по общо 34 договора с изпитване на светлотехнически и електротехнически характеристики на LED осветители с 10 фирми и 2 общини. Общият брой на изпитваните осветители по стопанска дейност е 196, от които:

- за 130 броя се измерват светлоразпределението, светоотдаването, тока, мощността и фактора на мощността с гониофотометъра;
- за 66 броя се измерват цветовите характеристики, спектралната интензивност на видимия спектър и светоотдаването със спектрорадиометъра.

Общият брой на изпитваните лампи и осветители за стопанска, научноизследователска и учебна дейност в лабораторията в периода от началото на 2021 г. до август 2025 г. е 245.



В табл. 3 е показано разпределението по област на приложение на изпитваните в лабораторията лампи и осветители. В табл. 4 е показано разпределението на светлинните източници по вид на технологията.

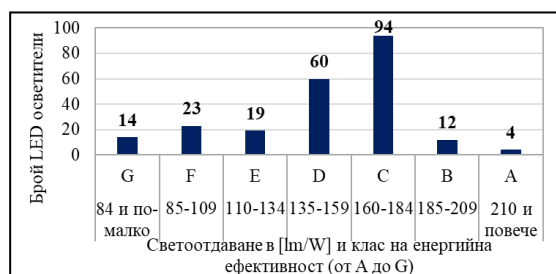
На фиг. 7 е показана хистограма на разпределение на светоотдаването η и класа на енергийна ефективност за изследваните в периода от началото на 2023 г. до август 2025 г. 226 броя LED осветители, а на фиг. 8 – хистограма на разпределение на корелираната цветна температура T_{cr} за изследваните със спектрорадиометъра LED осветители за същия период.

Табл. 3. Разпределение по приложение на изпитваните лампи и осветители

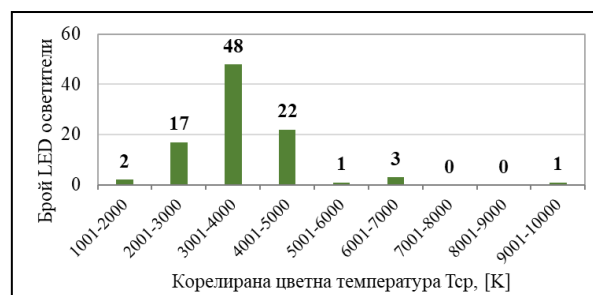
Приложение на изпитваните в лабораторията лампи и осветители	Брой
Улично осветление	163
Външно осветление (прожектори)	9
Вътрешно осветление, от което	66
- индустриално	15
- обществено (неиндустриално)	13
- жилищно	38
Оранжевоструменно осветление	7
Общ брой	251

Табл. 4. Разпределение на светлинните източници по вид на технологията

Вид на светлинния източник	Брой
Нажежаема лампа	5
Нажежаема халогенна лампа	2
Дихроична халогенна лампа	2
Компактна луминесцентна лампа	6
Металхалогенна лампа	2
Ксенонова лампа	2
LED	226



Фиг. 7. Хистограма на разпределение на светоотдаването



Фиг. 8. Хистограма на разпределение на корелираната цветна температура

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Извършените изпитвания на 245 броя лампи и осветители за стопанства, научно-изследователската и учебна дейност доказват работоспособността и точността на внедреното оборудване, както и високата квалификация на екипа в акредитираната по БДС EN ISO/IEC 17025:2018 научноизследователска лаборатория С7.3 „Екологични, енергоспестяващи и електромагнитно съвместими светлотехнически, LED и ВЕИ компоненти и технологии“ към Центъра за компетентност. Реализираните договори за стопанска дейност с фирми и общини от България и чужбина утвърждават лабораторията като една от водещите в региона за акредитирано изпитване на лампи и осветители.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“



ЛИТЕРАТУРА

- [1] BDS EN 13032-2:2018 – Light and lighting - Measurement and presentation of photometric data of lamps and luminaires.
- [2] CIE 121-1996 – The Photometry and Gonio-photometry of Luminaires.
- [3] CIE 177:2007 – Colour Rendering of White LED Sources.
- [4] Tsankov, P., I. Soyakov, M. Yovchev, Development of a goniophotometer calibration measurement model for an uncertainty budget applied to the accreditation of a new lighting laboratory according to ISO/IEC 17025:2017, Balkan Light 2024 Conference, 28-29 November 2024, Istanbul, ISBN 978-975-561-729-9.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

МОНИТОРИНГ НА ПРОИЗВОДИТЕЛНОСТТА НА СВЪРЗАНА КЪМ МРЕЖАТА ФОТОВОЛТАИЧНА ЕЛЕКТРОЦЕНТРАЛА В ГАБРОВО ТЕХ ПАРК

PERFORMANCE MONITORING OF A GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC POWER PLANT IN GABROVO TECH PARK

Plamen Tsenkov Tsankov
Technical University of Gabrovo
plamen@tugab.bg

Ivaylo Vasilev Lazarov
Technical University of Gabrovo
iv_lazarov@tugab.bg

Hristo Todorov Ibrishimov
Technical University of Gabrovo
ico@tugab.bg

Milko Todorov Yovchev
Technical University of Gabrovo
myovchev@tugab.bg

Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract

The paper presents the capabilities of the monitoring system for a photovoltaic power plant located on the roof of the building of the Center for Competence "Intelligent Mechatronics, Eco- and Energy-Saving Systems and Technologies". The photovoltaic power plant consists of three photovoltaic subsystems with the following photovoltaic technologies - cadmium telluride, monocrystalline silicon and copper indium gallium selenide. A comparison of the performance of photovoltaic systems with modules made of monocrystalline silicon and copper indium gallium selenide is made. The daily variation of solar radiation and the total monthly values of the solar irradiation in the plane of the photovoltaic modules are shown. From the data obtained from the monitoring system, a comparison of the performance of different types of photovoltaic technologies under relevant operating conditions can be made. The obtained solar radiation values can be used to analyze the state of solar potential for the Gabrovo region.

Keywords: photovoltaic power plant; monitoring system; performance of the photovoltaic system.

ВЪВЕДЕНИЕ

В последните години развитието на технологиите за получаване на енергия от възобновяеми енергийни източници бележи сериозен прогрес. Чрез Директива 2009/28/ЕС се насърчава използването на енергия от възобновяеми енергийни източници [1]. Доминираща роля от възобновяемите енергийни източници имат фотоволтаичите, поради лесния им монтаж и

поддръжка и ниската им цена спрямо останалите възобновяеми енергийни източници. Фотоволтаичните технологии се разделят на три поколения [2]. Първо поколение са фотоволтаични модули от монокристален силиций, за които ефективността им достига до 17÷22 % и цена за 1 Wp – \$1,00 ÷ \$1,50 [3]. Към тази група принадлежат и фотоволтаични модули с технология от поликристален силиций на



които ефективността достига до $13\div 17\%$ и цена между \$0,90 и \$1,20 за 1Wp. Второ поколение са тънкослойните фотоволтаични технологии (CdTe и CIGS) за които ефективността достига $10\div 13\%$, а цената за 1Wp е между \$0,70 и \$1.00. Трето поколение са перовскитни соларни клетки за които в лабораторни условия са достигнати стойности за ефективността около 30% [4]. Важна част от една фотоволтаична система е системата ѝ за мониторинг. Една система за мониторинг се състои от сензори за събиране на данни като слънчева радиация, температура на околната среда, влажност, ток и напрежение на фотоволтаичните модули. Също така е необходима мрежова технология за предаване на данните – Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee, CSM-CPRS, LoRa. За обработка на данните се използват различни видове контролери (Arduino, RaspberryPi и др) [5]. Системата за мониторинг трябва да съдържа и интерфейс за визуализация на данните и сървър за анализ на данните.

ИЗЛОЖЕНИЕ

На покрива на сградата на Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“ е разположена фотоволтаична електроцентрала, състояща се от фотоволтаични модули от три типа технологии. Фотоволтаичната електроцентрала с модули от CdTe се състои от 96 фотоволтаични модула, модел CX4 100/3. Всеки модул е с мощност 100Wp, а максимална мощност на фотоволтаичната електроцентрала с модули от CdTe е 9,6 kWp. Фотоволтаичната електроцентрала с модули от CIGS се състои от 90 модула, тип 1100E1. Всеки модул е с единична мощност 110 Wp. Общата инсталирана мощност на фотоволтаичната електроцентрала с модули от CIGS е 9,9 kWp. Фотоволтаичната електроцентрала с модули от m-Si се състои от 44 модули,

тип SYP250M. Всеки модул е с единична мощност 250 Wp, а общата инсталирана мощност на фотоволтаичната електроцентрала с модули от m-Si е 9 kWp.

Фотоволтаичните модули са монтирани на метална рамка под 33° спрямо хоризонта и с ориентирани на $18,4^\circ$ спрямо чистия Юг.

Трите фотоволтаични подсистеми са свързани към три синусоидални трифазни мрежови фотоволтаични стринг инвертора, модел SUN2000-10KTL-M0 (Huawei), които преобразуват постоянния ток, генериран от трите фотоволтаични подсистеми с различен тип фотоволтаични технологии, в променлив ток, подавайки го към електрическата мрежа.

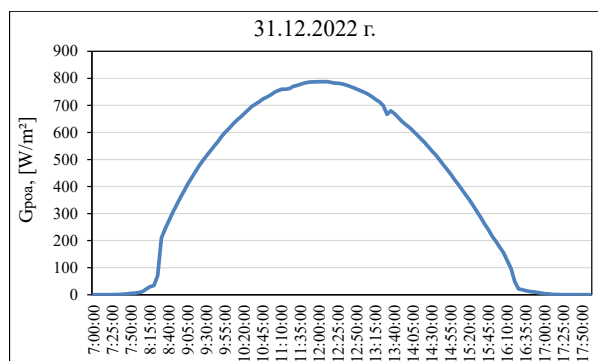
Системата за мониторинг с интелигентен регистратор, модел Solar-Log 300 включва функция за дистанционна аларма и графична оценка на компютър.

Системата за мониторинг на трите фотоволтаични електроцентрали се осъществява чрез директна комуникация с трифазните синусоидални инвертори чрез RS485, WLAN, Wi-Fi/4G или чрез мобилно приложение FusionSolar и детайлно наблюдение от интелигентен логер Solar-Log 300. Мобилното приложение показва мрежово свързани, дневни, месечни и годишни стойности за произведената електрическа енергия. Данните от системата за мониторинг могат да се експортират xlsx формат. От получените данни могат да се построят зависимости на електрически и метеорологични характеристики на фотоволтаичната електроцентрала за различен времеви период – дневен, месечен или годишен.

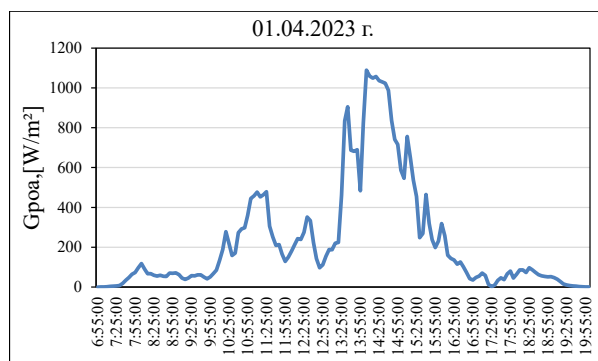
От системата за мониторинг могат да се получат метеорологични данни, които могат да се получат от системата за мониторинг са слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули, температура на околната среда и скорост на вятъра. На фиг. 1 е показано дневното изменение на

слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули за ден с ясно и слънчево време, а на фиг. 2 е показано изменението на слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули за ден с преобладаващо облачно време.

При умножение на сумарните месечни стойности на слънчевата радиация по съответния времеви интервал се получават сумарните месечни стойности на енергията на слънчевата радиация.



Фиг. 1. Изменение на слънчевата радиация за ден със слънчево и ясно време

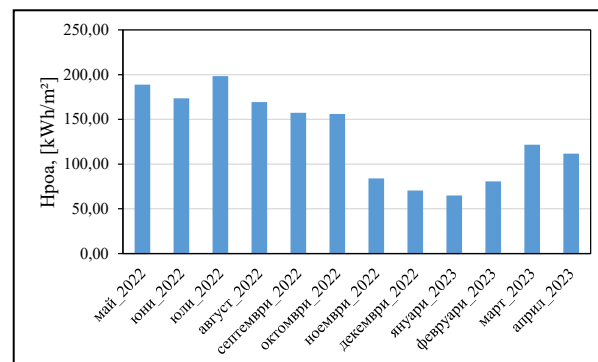


Фиг. 2. Изменение на слънчевата радиация за ден с преобладаващо облачно време

На фиг. 3 е показано изменението на сумарните месечни стойности за енергията на слънчевата радиация (H_{poa}) в равнината на фотоволтаичните модули за периода май 2022 г. – април 2023 г.

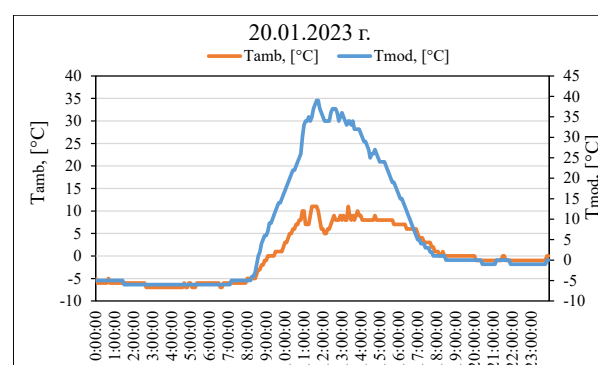
Най – високи сумарни месечни стойности за H_{poa} са получени за август 2022 г и май 2022 г. – 198,41 kWh/m² и 188,76

kWh/m². За декември 2022 г. и януари 2023 г. са получени сумарни месечни стойности за H_{poa} от 70,48 kWh/m² и 64,85 kWh/m².



Фиг. 3. Изменение на сумарните месечни стойности на енергията на слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули за периода май 2022 г. – април 2023 г.

Освен околната температура, системата за мониторинг е снабдена и с датчик за температурата на модулите от монокристален силиций. На фиг. 4 е показано изменението на температурата на околната среда и температурата на фотоволтаичните модули от монокристален силиций за едно денонощие (20.01.2023 г.).



Фиг. 4. Изменение на околната температура и температурата на фотоволтаични модули от монокристален силиций за 20.01.2023 г.

От изменението на температурата на околната среда и температурата на фотоволтаичните модули от монокристален си-



лиций се вижда, че в тъмната част на денонощието няма разлика в стойностите на двете температури. В светлата част на денонощието и особено в часовете с най-високо слънцегреене се наблюдава най-голяма разлика между околната температура и температурата на фотоволтаичните модули от m-Si. Максимална разлика от 30°C между двете температури е получена в 11:55 h.

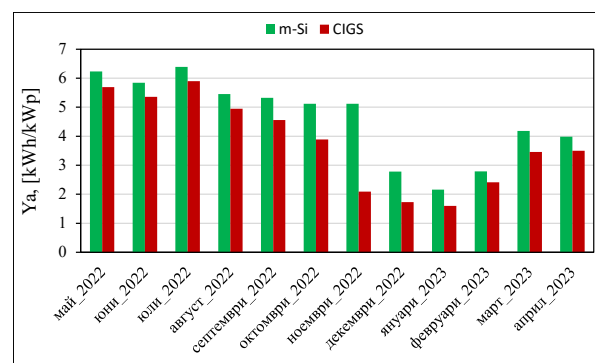
Данните, получени от системата за мониторинг за произведената електрическа енергия от фотоволтаичните модули и отдадената електрическа енергия от фотоволтаичната система към електрическата мрежа, дават възможност да се изчислят характеристики, които дават възможност да се оцени производителността на фотоволтаичната система. Такива характеристики са специфично електропроизводство на фотоволтаичните модули (array yield Y_a), фотоволтаичната система (final yield Y_f), ефективност на модулите (η_{pv}), фотоволтаичната система (η_{sys}) и инверторите (η_{inv}), коефициент на използване на фотоволтаичната система (capacity utilization factor CUF) и коефициент на загубите (performance ratio PR).

В настоящия доклад е направено сравнение на производителността на фотоволтаичните подсистеми с модули от монокристален силиций (m-Si) и медно-индиев галиев диселенид (CIGS).

На фиг. 5 е показано средното дневно месечно изменение на специфичното електропроизводство на фотоволтаичните модули (Y_a) от монокристален силиций (m-Si) и медно-индиев галиев селенид за периода май 2022 г. – април 2023 г.

В таблица 1 са показани изчислените средни дневни стойности за специфичното електропроизводство на двете фотоволтаични технологии за разглеждания период от време.

За всички месеци от разглеждания период са получени най-високи средни месечни стойности за специфичното електропроизводство за фотоволтаичните модули от монокристален силиций.



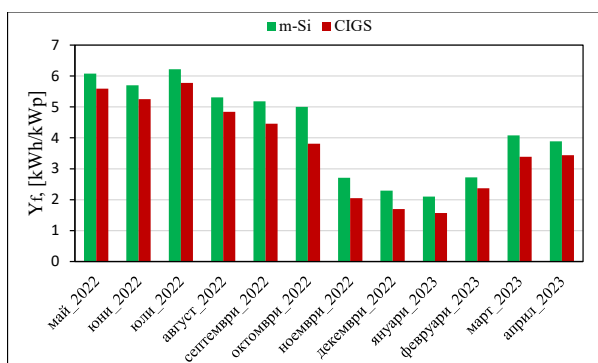
Фиг. 5. Изменение на специфичното електропроизводство (array yield Y_a) за фотоволтаични модули от m-Si и CIGS за периода май 2022 г. – април 2023 г.

Таблица 1. Изчислени средни дневни стойности за специфичното електропроизводство (Y_a) за фотоволтаични модули от m-Si и CIGS за периода май 2022 г. – април 2023 г.

Месец	Array yield (Y_a), [kWh/kWp/d]	
	m-Si	CIGS
май 2022	6,23	5,69
юни 2022	5,84	5,36
юли 2022	6,39	5,90
август 2022	5,45	4,95
септември 2022	5,32	4,56
октомври 2022	5,12	3,89
ноември 2022	2,78	2,09
декември 2022	2,29	1,73
януари 2023	2,16	1,60
февруари 2023	2,79	2,41
март 2023	4,18	3,46
април 2023	3,98	3,50

Най-високи стойности за Y_a са получени за месеците май и юли 2022 г. – 6,23 и 6,39 kWh/kWp/d фотоволтаичните модули от m-Si и 5,69 и 5,90 kWh/kWp/d за фотоволтаичните модули от CIGS. За типично зимните месеци, декември 2022 г. и януари 2023 г. са получени най-ниските средни месечни стойности за специфичното електропроизводство. За модулите от m-Si тези стойности са съответно 2,29 и 2,16 kWh/kWp/d, а за модулите от CIGS стойностите са съответно 1,73 и 1,60 kWh/kWp/d.

На фиг. 6 е показано изменението на получените дневни средни месечни стойности за специфичното електропроизводство на фотоволтаичните подсистеми (final yield Y_f) модули от монокристален силиций и медно-индиев галиев селенид.



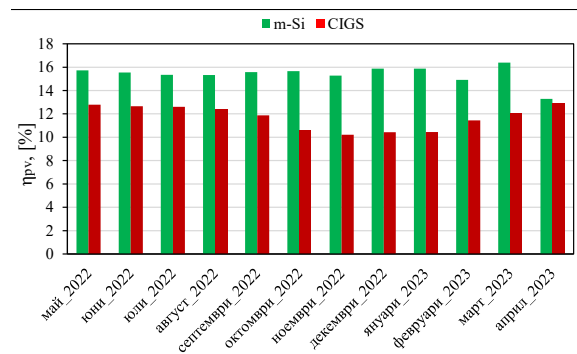
Фиг. 6. Изменение на специфичното електропроизводство (final yield Y_f) за фотоволтаични подсистеми с модули от m-Si и CIGS за периода май 2022 г. – април 2023 г.

За разглеждания период са получени най-високи средни месечни дневни стойности за Y_f за фотоволтаичната подсистема с модули от m-Si. Най-високи стойности за Y_f са получени за месеци май и юли 2022 г. За фотоволтаичната подсистема с модули от m-Si стойностите са 6,08 и 6,22 kWh/kWp/d, а за фотоволтаичната подсистема с модули от CIGS, стойностите са съответно 5,59 и 5,78 kWh/kWp/d. За декември 2022 г. и януари 2023 г. са получени

най-ниските дневни средни месечни стойности за специфичното електропроизводство за двете фотоволтаични подсистеми. За фотоволтаичната подсистема с модули от m-Si стойностите са 2,29 и 2,10 kWh/kWp/d, а за фотоволтаичната подсистема с модули от CIGS тези стойности са съответно 1,70 и 1,57 kWh/kWp/d.

Важна характеристика с която се оценява производителността на фотоволтаичните модули е тяхната ефективност (η_{pv}). На фиг. 7 е показано изменението на ефективността на двете фотоволтаични технологии за изследвания период.

За всички месеци от разглеждания период са получени най-високи стойности за ефективността за фотоволтаични модули от монокристален силиций. Тези стойности се изменят от 15,88 % за януари 2023 г. до 13,29% за април 2023 г. Получените стойности за ефективността на фотоволтаичните модули от CIGS се изменят от 10,21% за ноември 2021 г. до 12,86% за април 2023 г.

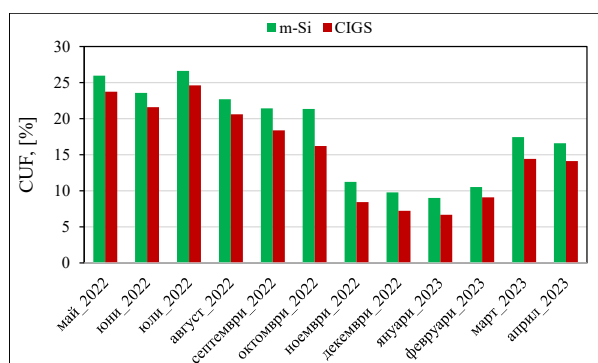


Фиг. 7. Изменение на ефективността на фотоволтаични модули от m-Si и CIGS за периода май 2022 г. – април 2023 г.

За оценка на ефективността на фотоволтаичната електроцентрала се използва коефициентът на използване на инсталираната мощност (capacity utilization factor CUF). За периода май-октомври 2022 г. са получени високи стойности за коефициента на използване за фотоволтаичната система с

модули от монокристален силиций. Стойностите за CUF се изменят от 25,94% за май 2022 г. до 21,35% за октомври 2022 г. Най-ниски стойности за коефициента на използване на фотоволтаична система с модули от монокристален силиций са получени за декември 2022 г. и януари 2023 г. – 9,78 и 9,00%. За фотоволтаичната система с модули от CIGS е получена най-висока стойност за коефициента на използване (CUF) за май 2023 г. – 23,73%. Най-ниски стойности за коефициента на използване за фотоволтаична система с модули от CIGS са получени за типично зимните месеци декември 2022 г. и януари 2023 г. Тези стойности са съответно 7,22% и 6,66%.

На фиг. 8 е показано изменението на коефициента на използване за фотоволтаични системи с модули от m-Si и CIGS за периода май 2022 г. – април 2023 г.



Фиг. 8. Изменение на коефициента на използване на фотоволтаични системи с модули от m-Si и CIGS за периода май 2022 г. – април 2023

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящия доклад са показани възможностите на системата за мониторинг на фотоволтаичната електроцентрала, разположена на покрива на сградата на Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“. В графичен вид са представено дневното изменение на слънчевата радиация, околната температура и температурата на фотоволтаичните модули от

монокристален силиций, както сумарните месечни стойности на енергията за слънчевата радиация в равнината на фотоволтаичните модули за период от дванадесет месеца. Направено е сравнение на някои характеристики на производителността на два вида фотоволтаични технологии – монокристален силиций и медно-индиев галиев селенид за период от 12 месеца – май 2022 г. – април 2023 г. За разглеждания период са получени по-добри резултати за фотоволтаичната подсистема с модули от монокристален силиций.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/BG/ALL/?uri=celex:32009L0028>
- [2] А. Кабакчиев, Б. Евстатиев. Анализ на основните фактори влияещи върху добива на фотоволтаични модули. Научни трудове на РУ „Ангел Кънчев“, Том 61, Серия 3.3, Електротехника, електроника и автоматика & комуникационна и компютърна техника, с.11-18, Русе, 2022.
- [3] <https://growingsolarmist.com/monocrystalline-solar-panel-efficiency-construction-functionality/>
- [4] <https://www.fluxim.com/research-blogs/perovskite-silicon-tandem-pv-record-updates>
- [5] A. Ayob, S. Ansari, H. Lipu, A. Hussain, M. H. Saad, Monitoring Technologies for Multi-Sensor System based on Wireless Data Transmission Modules. Int. J. Adv. Trends Comput. Sci. Eng, 9(1.2), 2020, 39-44.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ВЛИЯНИЕ НА РЕЖИМИТЕ НА ОХЛАЖДАНЕ ВЪРХУ МИКРОСТРУКТУРАТА НА АУСТЕНИТНА МАНГАНОВА СТОМАНА, ЛЕГИРАНА С НИКЕЛ И МОЛИБДЕН

EFFECT OF COOLING REGIMES ON THE MICROSTRUCTURE OF AUSTENITIC MANGANESE STEEL ALLOYED WITH NICKEL AND MOLYBDENUM

by

Vladimir Dunchev^{1,2}, Vladimir Todorov^{1,2}, Milka Atanasova^{1,2}, Marieta Ivanova^{1,2}

¹Department of Material Science and Mechanics of Materials, Technical University of Gabrovo,
5300 Gabrovo, Bulgaria

²Center of Competence “Smart Mechatronic, Eco- and Energy-Saving Systems and Technologies”,
Technical University of Gabrovo, 5300 Gabrovo, Bulgaria

Abstract

This study investigates the influence of different cooling regimes on the microstructural evolution of austenitic manganese steel alloyed with nickel and molybdenum. Three samples were prepared and subjected to different cooling treatments: air cooling after casting, water quenching from 1200 °C, and water quenching from 1000 °C. Backscattered electron (BSE) imaging was used to examine the microstructures. The results indicate that air cooling leads to the formation of well-developed carbides, while quenching suppresses carbide precipitation to varying extents, depending on the quenching temperature. The findings highlight the strong influence of cooling rate on carbide morphology, austenite stability, and consequently, the expected mechanical properties of the alloy.

Keywords: austenitic manganese steel; nickel; molybdenum; cooling regimes; microstructure; carbides

INTRODUCTION

Austenitic manganese steels, also known as Hadfield steels, are a well-known class of alloys that exhibit excellent wear resistance combined with remarkable toughness. Since their discovery by Robert Hadfield in the late 19th century, these steels have been extensively applied in demanding engineering sectors such as mining, railway, and heavy machinery [1-3]. The high manganese content stabilizes the austenitic phase at room temperature, which contributes to the

outstanding work-hardening ability of the alloy [2-4].

Despite these benefits, the microstructure of austenitic manganese steel is sensitive to processing conditions, especially to cooling rates after solidification or heat treatment [5-8]. During slow cooling, carbides such as (Fe, Mn)₃C may precipitate at grain boundaries, leading to embrittlement and loss of toughness [9-11]. In contrast, rapid quenching suppresses carbide precipitation and favors the retention of a fully austenitic

microstructure. The addition of alloying elements like nickel and molybdenum are often employed to improve toughness, enhance austenite stability, and refine carbide morphology [12].

Understanding the role of cooling regime is therefore essential for optimizing the balance between toughness, hardness, and wear resistance [13]. This paper presents a comparative study of three cooling regimes applied to austenitic manganese steel alloyed with nickel and molybdenum, with the objective of linking microstructural changes to potential property variations.

MATERIALS AND METHODS

The investigated material is an austenitic manganese steel alloyed with nickel and molybdenum, which was cast into ingot form and subsequently sectioned into three samples for analysis. The chemical composition in mass percentages was measured via optical emission spectrometer (Foundry-Master Optimum, HITACHI, Tokyo, Japan). The chemical composition of manganese steel is shown in Table 1.

Table 1. Chemical composition of the austenitic manganese steel.

Chemical Element, wt%

<i>Fe</i>	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>	<i>Mo</i>	<i>Si</i>	<i>C</i>
bal.	18.62	3.64	1.15	0.75	1.73

Immediately after casting, each sample was subjected to a distinct cooling regime:

- Sample 1: Air cooled at ambient laboratory conditions, representing a relatively slow cooling rate.
- Sample 2: Heating to 1200 °C followed by rapid water quenching, representing the highest cooling rate at higher temperature.
- Sample 3: Heating to 1000 °C followed by rapid water quenching, representing the highest cooling rate at lower temperature.

Prior to microstructural examination, the samples were ground, polished, etched to reveal their microstructures. The microstructure was observed via scanning electron microscopy (SEM, Zeiss Evo 10, Jena, Germany). Backscattered electron (BSE) imaging was performed at $\times 1000$ magnification. This technique provides strong atomic number contrast that enables clear differentiation of carbides from the austenitic matrix.

RESULTS AND DISCUSSION

The air-cooled specimen (*Figure 1*) reveals extensive carbide precipitation along grain boundaries and occasionally within grains. The carbides appear relatively coarse and continuous, which is indicative of slow cooling. Such microstructural features typically degrade toughness and may lead to intergranular fracture under service conditions. However, the presence of carbides also contributes to improved hardness and wear resistance, which can be beneficial in applications involving abrasive conditions. The contrast between carbide and matrix in BSE imaging clearly highlights their distribution, confirming the tendency of carbides to form networks at grain interfaces under slow cooling.

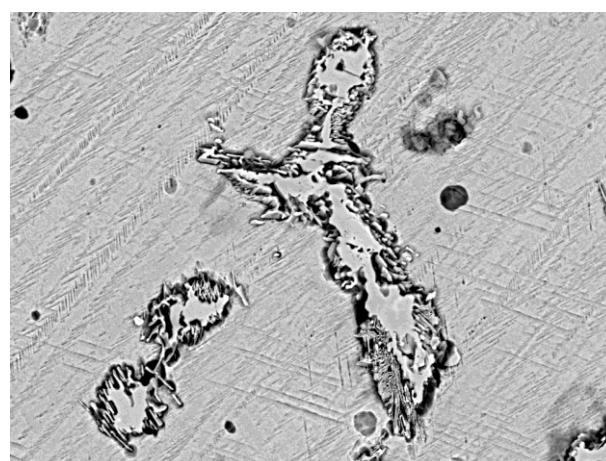


Fig. 1. Microstructure of the austenitic manganese steel after air cooling (BSE, $\times 1000$)

The specimen quenched from 1200 °C (*Figure 2*) shows a predominantly austenitic matrix with only minor traces of carbide formation. The higher solution treatment temperature ensures complete dissolution of pre-existing carbides prior to quenching, while the rapid cooling prevents their re-precipitation. This microstructure is associated with superior toughness, impact strength, and resistance to brittle fracture. The fine and uniform austenitic grains suggest effective suppression of diffusion-controlled transformations. This condition is particularly desirable in components exposed to high-impact service.

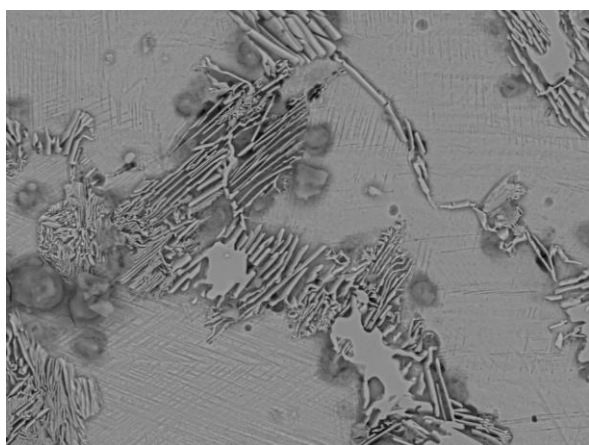


Fig. 2. Microstructure of the austenitic manganese steel quenched from 1200 °C (BSE, $\times 1000$)

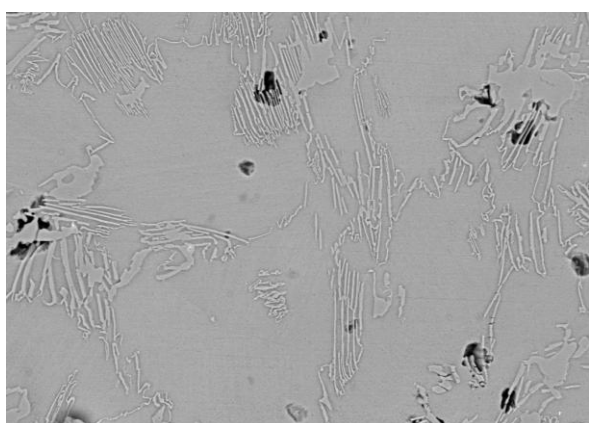


Fig. 3. Microstructure of the austenitic manganese steel quenched from 1000 °C (BSE, $\times 1000$)

By comparison, the specimen quenched from 1000 °C (*Figure 3*) displays an intermediate structure. Some carbides remain visible, suggesting that the lower solution treatment temperature was insufficient to fully dissolve all carbides before quenching. Nevertheless, the microstructure still contains less carbide content than the air-cooled specimen, indicating that quenching from 1000 °C provides partial stabilization of the austenite. This condition may offer a compromise between hardness and toughness, depending on the intended application. The results imply that heat treatment plays as critical a role as cooling rate in controlling the extent of carbide dissolution and precipitation.

Overall, the results highlight the critical interplay between solution treatment temperature and cooling rate in determining the final microstructure. For applications requiring maximum toughness, quenching from higher solution treatment temperatures is preferable, whereas for applications demanding greater wear resistance, controlled carbide precipitation may be advantageous. The present study demonstrates how subtle variations in processing parameters can lead to pronounced differences in microstructural evolution.

CONCLUSION

The investigation clearly demonstrates the significant role of cooling regime in governing the microstructural development of austenitic manganese steel alloyed with nickel and molybdenum. Air cooling after casting leads to the precipitation of coarse carbides at grain boundaries, which can impair toughness and ductility. On the other hand, rapid quenching from 1200 °C effectively suppresses carbide formation and retains a predominantly austenitic structure, thus providing an optimal foundation for high toughness and impact resistance.



Quenching from 1000 °C yields a microstructure of intermediate characteristics: while the cooling rate is sufficient to reduce carbide formation relative to air cooling, incomplete dissolution of carbides prior to quenching results in some precipitation. This balance may be advantageous in applications where both hardness and toughness are required. Overall, the results suggest that solution treatment and quenching from sufficiently high temperatures (such as 1200 °C) are essential for achieving maximum austenite stability and avoiding detrimental carbide precipitation.

These findings not only provide insights into the processing of manganese steels with nickel and molybdenum additions but also highlight the importance of tailoring cooling regimes to match desired mechanical properties. Future work should include mechanical testing (hardness, impact toughness, and wear resistance) to directly correlate microstructural observations with performance outcomes. Such studies would contribute to establishing optimized heat treatment schedules for industrial applications of these alloys.

Acknowledgements

This study was supported by the European Regional Development Fund under the Operational Programme “Research, Innovation and Digitalization for Smart Transformation” 2021-2027, Project No. BG16RFPR002-1.014-0005 Center of Competence “Smart mechatronic, eco- and energy-saving systems and technologies.”

REFERENCES

- [1] R. A. Hadfield, "Manganese Steel," Journal of the Iron and Steel Institute, vol. 34, pp. 40–52, 1888.
- [2] Ayadi, Souad, and Ali Hadji. "Effect of chemical composition and heat treatments on the microstructure and wear behavior of manganese steel." International Journal of Metal casting 15.2 (2021): 510-519.
- [3] Gürol, Uğur, and Engin Kocaman. "Effect of different heat treatment procedures on the corrosion behavior of high-manganese austenitic steels." International Journal of Metal casting (2025): 1-14.
- [4] G. F. Vander Voort, "Metallography, Principles and Practice," ASM International, 1999.
- [5] A. P. Gulyaev, "Heat Treatment of Metals," Mir Publishers, Moscow, 1980.
- [6] O. Bouaziz, S. Allain, C.P. Scott, P. Cugy, D. Barbier, High manganese austenitic twinning induced plasticity steels: A review of the microstructure properties relationships, Current Opinion in Solid State and Materials Science, Volume 15, Issue 4, 2011, Pages 141-168, ISSN 1359-0286, <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2011.04.002>.
- [7] Srivastava, A.K., Das, K. Microstructural characterization of Hadfield austenitic manganese steel. J Mater Sci 43, 5654–5658 (2008). <https://doi.org/10.1007/s10853-008-2759-y>.
- [8] Dobrzanski, L. A., A. Grajcar, and W. Borek. "Microstructure evolution of high-manganese steel during the thermomechanical processing." Archives of Materials Science 70 (2009):70.
- [9] Gürol, U., & Kurnaz, S. C. (2020). Effect of Carbon and Manganese Content on the Microstructure and Mechanical Properties of High Manganese Austenitic Steel. Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy, 56(2), 171-182.
- [10] N.A. Polekhina, I.Yu. Litovchenko, S.A. Akkuzin, K.V. Spiridonova, A.V. Kim, V.V. Osipova, V.M. Chernov. The effect of annealing on microstructure and microhardness of low-activation high-manganese austenitic steel. Lett. Mater., 2024, 14(1) 51-56.
- [11] Witkowska, M., et al. "Microstructural changes in a high-manganese austenitic Fe-



- Mn-Al-C steel." Archives of Metallurgy and Materials 59.3 (2014): 971-975.
- [12] E. O. Hall and S. H. Algie, "The Effect of Nickel and Molybdenum on Austenitic Manganese Steels," Journal of the Iron and Steel Institute, vol. 173, pp. 154–164, 1953.
- [13] Wittig, J. E., et al. "Temperature Dependent Deformation Mechanisms of a High Nitrogen-Manganese Austenitic Stainless Steel." steel research international 80.1 (2009): 66-70.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ПРИЛОЖЕНИЯ НА СКАНИРАЩИ ЕЛЕКТРОННИ МИКРОСКОПИ И РЕНТГЕНОВИ ДИФРАКТОМЕТРИ В МАТЕРИАЛОЗНАНИЕТО И МЕТАЛУРГИЯТА

APPLICATIONS OF SCANNING ELECTRON MICROSCOPES AND X-RAY DIFFRACTOMETERS IN MATERIALS SCIENCE AND METALLURGY

by

Vladimir Dunchev^{1,2}, Vladimir Todorov^{1,2}, Milka Atanasova^{1,2}, Marieta Ivanova^{1,2}

¹Department of Material Science and Mechanics of Materials,
Technical University of Gabrovo, 5300 Gabrovo, Bulgaria

²Center of Competence “Smart Mechatronic, Eco- and Energy-Saving Systems and Technologies”,
Technical University of Gabrovo, 5300 Gabrovo, Bulgaria

Abstract

Advances in materials science and metallurgy rely heavily on analytical tools capable of probing both the surface features and the atomic structure of materials. Among the most powerful instruments in this field are the Scanning Electron Microscope (SEM) and the X-Ray Diffractometer (XRD). Together, they allow researchers and engineers to study microstructures, identify phases, and link material properties to processing techniques. This article explores how SEM and XRD are applied specifically in metallurgy and materials science, highlighting their contributions to alloy development, failure analysis, and quality control.

Keywords: Scanning Electron Microscope (SEM); X-Ray Diffractometer (XRD); Metallurgy; Materials Science; Microstructure; Phase Analysis; Residual Stress; Failure Analysis; Corrosion; Heat Treatment

SCANNING ELECTRON MICROSCOPE (SEM) IN METALLURGY

Microstructural Characterization

SEM is widely used to analyze the microstructure of metals and alloys (Fig. 1). By imaging grains, inclusions, and precipitates, metallurgists can understand how heat treatments or processing conditions affect material properties. For example:

- Grain Size Analysis: Fine-grained structures usually enhance strength and toughness, while coarse grains can reduce mechanical performance.

- Precipitation Studies: Precipitates in alloys such as aluminum or titanium influence hardness and corrosion resistance.

Fractography

In failure analysis, SEM provides detailed images of fracture surfaces. It helps determine whether a component failed due to ductile fracture (dimpled surfaces), brittle fracture (cleavage facets), or fatigue (striations). This information is critical in industries such as aerospace and automotive, where failures can have severe consequences.



Fig. 1. Zeiss Evo 10 scanning electron microscope [1,2,4]

Corrosion and Surface Studies

SEM is essential for examining corrosion products and mechanisms. Metallurgists use it to study pitting, intergranular corrosion, and protective coatings. By combining SEM with Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS), one can identify the chemical composition of corrosion layers or inclusions.

X-RAY DIFFRACTOMETER (XRD) IN METALLURGY

Phase Identification

XRD is the primary tool for phase analysis in metals (Fig. 2). It can distinguish between different crystalline phases present in steel, aluminum alloys, and other engineering materials. For example:

- In steels, XRD identifies the presence of austenite, ferrite, martensite, and carbides.
- In titanium alloys, it can determine the proportions of alpha and beta phases, which directly affect mechanical properties.

Residual Stress Analysis

Residual stresses, introduced during processes like welding, forging, or rolling, can significantly influence fatigue performance. XRD residual stress measurement helps engineers design components that are less prone to cracking or premature failure.

Texture and Crystallographic Orientation

XRD is used to measure texture, or the preferred orientation of grains in a polycrystalline material. Texture influences properties such as anisotropy, formability, and magnetic behavior. For instance, controlling texture in rolled sheets of aluminum or steel is vital in automotive manufacturing.



Fig. 2. Bruker D8 Advance x-ray diffractometer [2-4]

Heat Treatment Studies

By monitoring phase changes during heating or cooling, XRD helps optimize annealing, quenching, and tempering processes. It allows metallurgists to link heat treatment conditions with resulting microstructures and mechanical properties.

Complementary Use of SEM and XRD in Metallurgy

SEM and XRD provide complementary insights:

- SEM offers high-resolution images of microstructures and fracture surfaces (Fig. 3a and Fig. 3b).

- XRD identifies the crystal structures and phases responsible for observed properties (Fig 4).

Fig. 3a shows the boundary between ductile cast iron and the weld seam. Along the weld seam boundary, a dendritic structure with grains elongated towards the core of the weld are clearly visible. Spheroidal graphite inclusions are visible on the cast iron side. A pearlite structure is visible along the boundaries of the graphite inclusions, and the metal matrix is made up of ferrite grains. Carbides are also visible in the structure of the cast iron, which are also proven by phase analysis (Fig. 4).

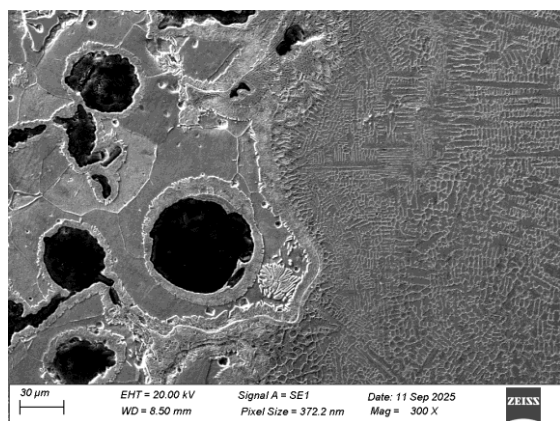


Fig. 3a. Microstructure of weld of ductile cast iron and AISI 316 stainless steel (ductile cast iron side of the weld)

Fig. 3b shows a clearly defined boundary between the weld and austenitic stainless steel. The structure of the weld is made up of a fine crystals in the core of the weld, while a zone with elongated crystal grains is visible towards the boundary. In the austenitic steel zone, a structure typical of this class of steel is visible, made up of relatively uniform large grains with twins in some of them. The phase analysis shows peaks characteristics of an austenitic structure, with the presence of weak ferrite peaks (Fig. 4). This is a consequence of the introduction of chemical elements part of

the ductile cast iron into the structure of the weld.

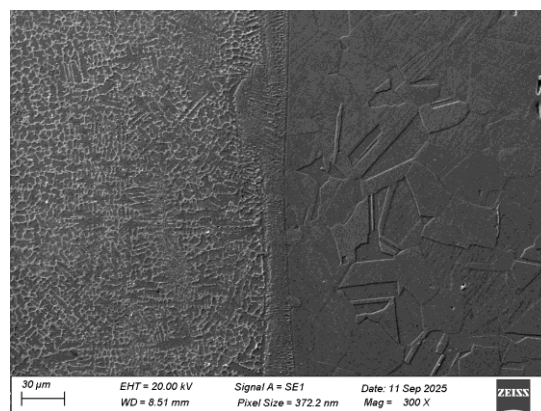


Fig. 3b. Microstructure of weld of ductile cast iron and AISI 316 stainless steel (AISI 316 stainless steel side of the weld)

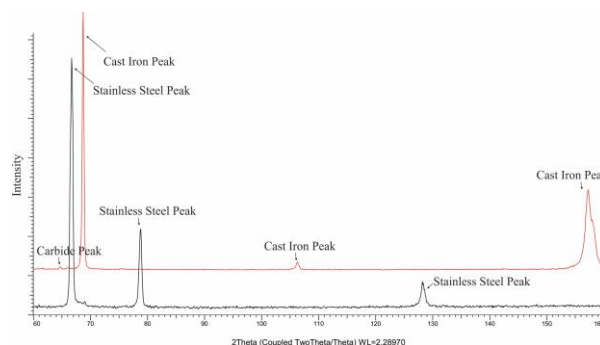


Fig. 4. Phase analyses of border of weld of ductile cast iron and AISI 316 stainless steel

EDX Analysis of the Weld

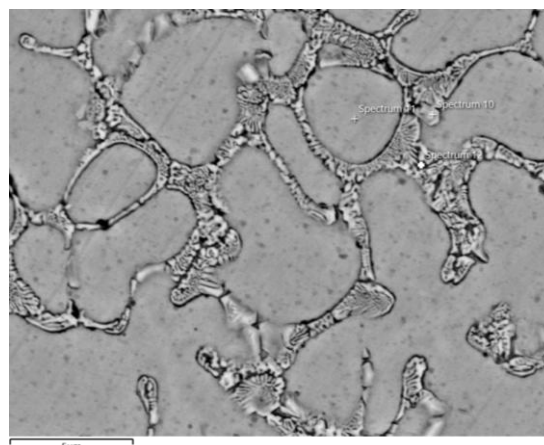


Fig. 5. Microstructure of weld of ductile cast iron and AISI 316 stainless steel



Fig. 5 shows microstructure of welded seam after electron beam welding of DCI and AISI 316 Stainless Steel. Via Energy Dispersive X-ray Spectrometry is determined the elemental composition of the weld in three points. *Spectrum 10* showed Cr enrichment (~11.6 wt%) with negligible Mo, consistent with Cr-rich segregation.

<i>Spectrum 10</i>		
<i>Element</i>	<i>Weight %</i>	<i>Atomic %</i>
<i>Si</i>	<i>2.04</i>	<i>3.94</i>
<i>Cr</i>	<i>11.59</i>	<i>12.12</i>
<i>Mn</i>	<i>1.26</i>	<i>1.24</i>
<i>Fe</i>	<i>80.75</i>	<i>78.64</i>
<i>Ni</i>	<i>4.37</i>	<i>4.05</i>
<i>Total</i>	<i>100.00</i>	<i>100.00</i>

Spectrum 11 revealed Fe-rich (~84.6 wt%) and Cr-poor (~6.8 wt%) composition, reflecting dilution by the cast iron base metal.

<i>Spectrum 11</i>		
<i>Element</i>	<i>Weight %</i>	<i>Atomic %</i>
<i>Si</i>	<i>2.21</i>	<i>4.28</i>
<i>Cr</i>	<i>6.81</i>	<i>7.14</i>
<i>Mn</i>	<i>1.01</i>	<i>1.00</i>
<i>Fe</i>	<i>84.63</i>	<i>82.62</i>
<i>Ni</i>	<i>5.34</i>	<i>4.96</i>
<i>Total</i>	<i>100.00</i>	<i>100.00</i>

Spectrum 12 displayed strong Cr (~15.8 wt%) and Mo (~3.5 wt%) enrichment, suggesting Mo/Cr-bearing carbides or oxides.

<i>Spectrum 12</i>		
<i>Element</i>	<i>Weight %</i>	<i>Atomic %</i>
<i>Si</i>	<i>1.66</i>	<i>3.26</i>
<i>Cr</i>	<i>15.84</i>	<i>16.81</i>
<i>Mn</i>	<i>1.45</i>	<i>1.46</i>
<i>Fe</i>	<i>74.10</i>	<i>73.21</i>
<i>Ni</i>	<i>3.48</i>	<i>3.27</i>
<i>Mo</i>	<i>3.47</i>	<i>1.99</i>
<i>Total</i>	<i>100.00</i>	<i>100.00</i>

CONCLUSION

In metallurgy and materials science, Scanning Electron Microscopes and X-Ray Diffractometers are indispensable tools. SEM provides detailed surface and microstructural images, essential for analyzing grains, inclusions, fractures, and corrosion. XRD complements this by revealing the crystal structures, phases, and stresses that determine material properties. Together, these instruments not only support the development of advanced alloys but also ensure safety, performance, and reliability in critical industries such as aerospace, automotive, and energy. Their role in connecting microstructure to performance makes them central to the ongoing progress of materials engineering.

Acknowledgements

This study was supported by the European Regional Development Fund under the Operational Programme "Research, Innovation and Digitalization for Smart Transformation" 2021-2027, Project No. BG16RFPR002-1.014-0005 Center of Competence "Smart mechatronic, eco- and energy-saving systems and technologies."

REFERENCES

- [1] <https://www.zeiss.com/metrology/en/systems/industrial-microscopy/electron-microscopes/zeiss-evo.html>
- [2] Maximov, J.; Duncheva, G.; Anchev, A.; Dunchev, V.; Anastasov, K.; Ichkova, M. Sustainable Combined Process for Improving Surface Integrity and Fatigue Strength of Heat-Treated 42CrMo4 Steel Shafts and Axles. *Metals* 2025, 15, 755. <https://doi.org/10.3390/met15070755>
- [3] <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/diffractometers-and-x-ray->



microscopes/x-ray-diffractometers/d8-advance-family/d8-advance.html

- [4] Argirov, Y.; Maximov, J.; Duncheva, G.; Anchev, A.; Dunchev, V.; Mechkarova, T. Evolution of Surface Integrity Characteristics

and Mechanical Behavior of Diamond Burnished and Turned AISI 304 Steel Specimens After Prolonged Exposure to Natural Seawater. Coatings 2025, 15, 31. <https://doi.org/10.3390/coatings15010031>



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ЕЛЕКТРОННО ЛЪЧЕВО ПОВЪРХНОСТНО ОБРАБОТВАНЕ И ЗАВАРЯВАНЕ В ЦЕНТЪРА ЗА КОМПЕТЕНЦИЯ „ИНТЕЛИГЕНТНИ МЕХАТРОНИЧНИ, ЕКОЛОГИЧНИ И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ

ELECTRON BEAM SURFACE TREATMENT AND WELDING AT THE CENTRE OF COMPETENCE “SMART MECHATRONIC, ECO- AND ENERGY-SAVING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

**Stefan Valkov^{1,2,3}, Georgi Kotlarski^{1,3}, Nikolay Nedyalkov^{1,3}, Tatyana Koutzarova^{1,3},
Maria Ormanova^{1,2,3}, Borislav Stoyanov^{2,3}, Ivana Ilievska^{1,3}**

¹*Institute of Electronics, Bulgarian Academy of Sciences, 1784 Sofia, Bulgaria*

²*Technical University of Gabrovo, 5300 Gabrovo, Bulgaria*

³*Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"*

Abstract

During the present work, the results of the research conducted in the Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies" were presented. The processes occurring during electron beam surface modification (EBSM), electron beam surface alloying (EBSA), and electron beam welding (EBW) were briefly explained. The possibility of improving the surface properties through means of EBSM and EBSA were discussed and new methods for formation of surface layers was presented. Additionally, the welding possibility and results of EBW of similar and dissimilar metals and alloys were discussed, and some of the most notable achievements in the field were presented. Temperature models describing in detail the process of electron beam welding were developed. The damping properties of high-entropy alloys and superalloys were investigated. The results obtained are of exceptional importance for the world literature and will contribute to the future optimization of electron beam surface modification, electron beam alloying, and electron beam welding, with the aim of implementing these results in a number of industrial sectors at the local and global level.

Keywords: electron beam welding, electron beam surface modification, electron beam surface alloying.

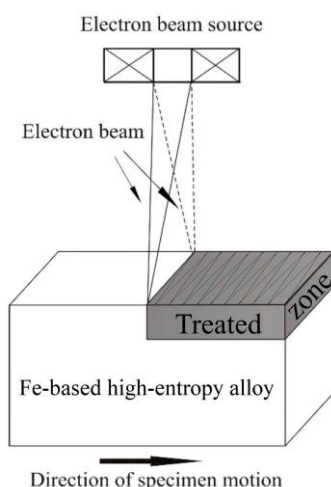
ВЪВЕДЕНИЕ

В днешната ера на понижаване на количеството на природните ресурси тяхната правилна обработка, включваща минимални загуби е от изключителна важност не само за природата, но и за различни индустриални отрасли, тъй като това би увеличило скоростта им на производство и понижило производствените загуби.

Съществуват набор от модерни техники и технологии, които целят именно оптимизация на употребата на природни ресурси. Един от тях включва употребата на висококонцентрирани енергетични потоци като електронни снопове, лазерни снопове и др. Електроннолъчевите технологии за получаване и обработване на материали са добре познати в световната практика. Те се

базират на облъчването на метални обекти чрез сноп от електрони. Последните предават своята кинетична енергия на материалната среда, което резултира в превръщането ѝ в топлина. Мощността на електронния сноп, както и неговата степен на фокусираност определят приложението му за извършване на три основни вида процеси: електроннолъчева повърхностна обработка (ЕЛПО), електроннолъчево легиране (ЕЛЛ) и електроннолъчево заваряване (ЕЛЗ).

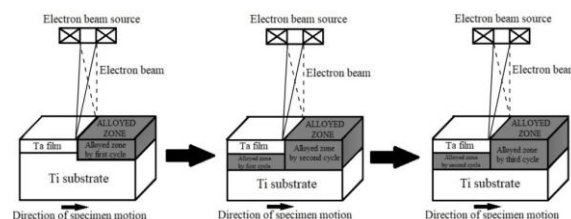
Примерна схема на електроннолъчевата повърхностна обработка е показана на фигура 1. За реализиране на този процес се използва силно разфокусиран сноп, с ниска до средна мощност (от 500 W до 3000 W). Облъчването на образците може да бъде извършено с или без разтопяване на най-горния им слой, като в последния случай температурата трябва да е достатъчно висока за индуциране на структурни и фазови промени в образеца.



Фиг. 1. Електроннолъчева повърхностна обработка [1]

На фигура 2 е показана примерна схема на повърхностно електроннолъчево легиране на метални образци. В този случай върху образците се нанася предварителен слой на желания легиращ елемент. Това може да се осъществи чрез набор от раз-

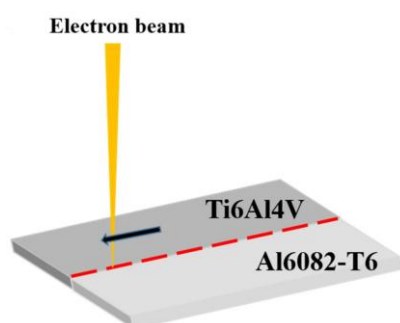
лични методи за физическо отлагане в газова фаза (електроннолъчево, магнетронно, електродъгово и т.н.). В този случай задължително се цели разтопяването на легиращия елемент и повърхността на образеца, при което легиращият елемент се вгражда в структурата му.



Фиг. 2. Електроннолъчево легиране [2]

Друг силно популярен метод за обработка на метали и техните сплави чрез електронен сноп е електроннолъчевото заваряване. Примерна схема на този процес е показана на фигура 3. При него се използва високофокусиран и високомощен електронен сноп, чрез който се цели пълно разтапяне на заваряваните материали и тяхното смесване до формиране на неразглюбяемо заваръчно съединение. Едно от основните предимства на този метод на заваряване е високата прониквателна способност на снопа от електрони. В зависимост от използваната система и технологичните условия електронният сноп може лесно да бъде използван за заваряване на детайли с дебелина 20-30 mm. Това обуславя този метод като изключително приложим за осъществяване на челни съединения, тъй като при конвенционалните процеси, такива като метал инертен газ (МИГ), волфрам инертен газ (ВИГ) и др., дълбочината на проникване е значително по-ниска, съответно се налага допълнителна обработка на заваряваните повърхности, оформянето на V-образни канали, прилагането на двустепенно заваряване и други технологични операции, които усложняват и оскъпяват

процеса. Други предимства на ЕЛЗ са малките зони на термично влияние, съответно по-ниските вътрешни напрежения в детайлите, по-голямата точност и прецизност на метода спрямо конвенционалните такива, възможността за пълна автоматизация (което е в съгласие с парадигмите на Индустрия 4.0) и най-вече извършването на процеса в среда на висок вакуум, което подобрява чистотата и качеството на заваръчните шевове.



Фиг. 3. Електронлъчево заваряване [3]

Целта на настоящия труд е формирането на обзор на научно-изследователската дейност, извършена до момента на територията на Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“, гр. Габрово по гореизброените научни тематики и резултатите, свързани с тях.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Предидни изследвания бяха направени, целящи повърхностна обработка на титанова сплав Ti6Al4V с различна скорост на обработка [4]. Бе установено, че по-високата скорост на сканиране води до по-усилена промяна в структурата на образците и повишена концентрация на мартензитна титанова фаза. Това резултира в повишена твърдост на повърхността на образците.

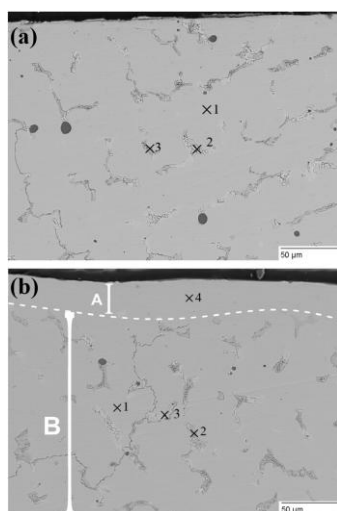
Направени бяха и експерименти с титанова сплав TC4 чрез различни геометрии на сканиране – линия, кръг и матрица [5].

Най-добри структурни и функционални свойства бяха получени чрез сканиране на образците чрез линейна геометрия, въпреки това кръговата геометрия се оказва близка по стойности и функционалност.

След изследванията на титановите сплави бе преминато към Inconel 625 сплав, която бе обработена две различни мощности на електронния сноп – 600 W и 1200 W [6]. Установено бе влиянието на мощността върху получената структура, като в случая на по-ниската мощност не бе забелязана термично обработена зона, а във втория случай бе забелязана такава с размер около 15 μm . В тази зона твърдостта на образца беше по-ниска, а пластичността по-висока поради отсъствието на Fe-богати преципитати, разпръснати из целия обем на основата.

Влиянието на тока на електронния сноп бе изследвано и по време на обработка на сплави от Co-Cr-Mo, като в този случай бе установено, че след обработка на изходната подложка (състояща се от двуфазна шестоъгълна плътно опакована и стеноцентрирана кубична структура) се наблюдава преструктуриране на образца в еднофазна стеноцентрирана кубична структура [7]. Наблюдава се и формирането на текстура при образца, облъчен с по-високия ток на електронния сноп към {111} семейство кристалографски равнини. Стеноцентрираната кубична структура има 12 равнини на хлъзгане, като последното основно се извършва при силно текстуриране към {111} семейство кристалографски равнини. Тази структура е най-симетричната и най-плътната сред различните видове структури, което съпътства и безпроблемното разпространение на дислокации сред нея. Тъй като това е основният механизъм на пластична деформация в кристалните структури може да се направи хипотеза, че направената обработка е повишила пластичността на обработената зона.

Тази хипотеза бе експериментално потвърдена при изследване на Fe-базирани супер сплави, при които се наблюдава същото преструктуриране като при Co-Cr-Mo такива [1]. Отново при по-високата мощност се наблюдава разтваряне на преципитатите от втора фаза, понижаване на твърдостта и повишаване на пластичността. Резултатите от тези експерименти са показани на фигури 4(а) и 4(б), които съответстват на мощностите 600 W и 1200 W.

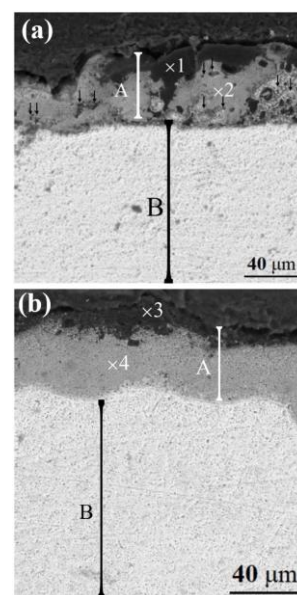


Фиг. 4. Електроннолъчева повърхностна обработка на Fe-базирана високоентропийна сплав чрез електронен сноп с мощност: (а) 600 W; (б) 1200 W [1]

Направени бяха и изследвания, целящи дълнително повишаване на експлоатационните свойства на бързорежеща инструментална стомана M2 чрез двустепенна обработка [8]. След ЕЛПО бе нанесен слой от WN чрез реактивно магнетронно разпръскване. И двете техники увеличиха твърдостта и понижиха коефициента на износване на образците.

Промяната на структурата и функционалните свойства на повърхността на метали и сплави може да бъде извършено и чрез електроннолъчево легиране. То се базира на нанасяне на слой от легиращия елемент чрез PVD метод, като например

магнетронно разпръскване и обработка на повърхността чрез електронен сноп. В следната работа [2] танталов филм с дебелина 4 µm бе нанесен върху титанови образци, след което повърхността бе обработена чрез сканиращ електронен сноп с мощност 1500 W. Процесът бе повторен няколкократно до достигане на 25 wt% съдържание на тантал в обработената зона, което понижи значително твърдостта и модула на Юнг на повърхността и увеличи приложимостта ѝ в индустрии като биомедицината.

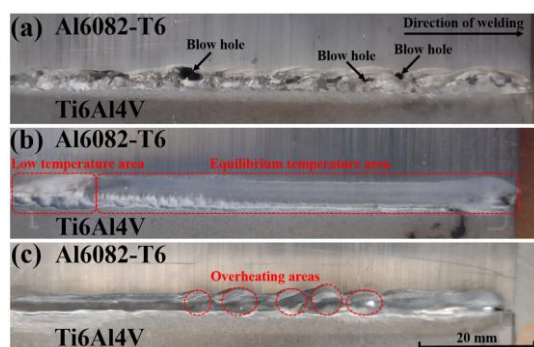


Фиг. 5. Електроннолъчево легиране на титан с бор чрез скорост на сканиране: (а) 4 mm/s и (б) 6 mm/s [9]

Бе изследвана и възможността за легиране на титан чрез бор, като част от резултатите са показани на фигури 5(а) и 5(б), получени чрез скорости на сканиране 4 и 6 mm/s [9]. И в двата случая успешно бе получена фазата TiB_2 , като при по-високата скорост на сканиране се регистрира микротвърдост на обработената зона от 4540 HV_{0.2}. В друга работа бе изследвана възможността за легиране на титан чрез въглерод, като целта бе получаване на фазата TiC, която успешно бе получена при ско-

рости на сканиране 5 и 15 mm/s [10]. Максималната твърдост получена бе 510 HV_{0.2}, което е 2.5 пъти по-висока стойност от тази на изходния материал.

Както бе споменато по-горе присъединяването на детайли чрез електроннолъчево заваряване (особено при челни съединения) е изключително атрактивно за набор от индустрии, в зависимост от избраните двойки. Възможно е заваряването на еднородни и разнородни метали и сплави с различни термофизични свойства като: мед/неръждаема стомана; мед/алуминий; титан/Ti6Al4V; Ti6Al4V/алуминий и други [11-14]. Оптимизирането на технологичните свойства до успешно получаване на заваръчни съединения е изключително трудна задача, включваща теоретични модели [15] и практически експерименти. Изключително трудна за заваряване двойка е титан/алуминий поради изключително ниската температура на топене на алуминия (около 660 °C) спрямо тази на Ti6Al4V (около 1660 °C). Алуминият също така има значително по-високи стойности на топлопроводност и температурен капацитет. На фигури 6(а), 6(б) и 6(в) са представени резултати от експерименти, целящи постигането на възможно най-високи стойности на механична здравина на заваръчните съединения.



Фиг. 6. Електроннолъчево заваряване на Ti6Al4V и Al6082-T6 при следните условия: (а) $I_b = 35$ mA и $V_w = 10$ mm/s; (б) $I_b = 20$ mA и $V_w = 5$ mm/s; (в) $I_b = 5$ mm/s, $V_w = 5$ mm/s и офсет към алуминиевата подложка 0.5 mm [3]

В случай на използване на ток на лъча $I_b = 20$ mA и скорост на заваряване $V_w = 5$ mm/s без офсет [фигура 7(б)] успешно бе получен равномерен заваръчен шев без видимо наличие на дефекти като пори и пукнатини. Направени бяха механични изпитвания, едно от които бе изпитване на якостта на опън. Получените резултати дефинират именно заваръчния шев, показан на фигура 6(б), като най-здрав с максимална якост на опън $R_m = 165$ MPa; граница на провлачване $R_y = 80$ MPa и удължение $\epsilon = 15.93$ %. Високата разлика между границата на провлачване и максималната якост на опън дефинира образца като високо пластичен и силно приложим в практиката на места, където са наложени строги изисквания за податливост на материалите преди настъпване на пълен провал. Това е от изключителна важност, тъй като при изделията, чиито стойности са сравнително еднакви, може да настъпи провал изненадващо, без предупреждение. В такива моменти дори няколко секунди биха могли да бъдат решаващи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение може да се каже, че по време на съвместната работа в Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“ бяха извършени редица експерименти с фундаментален характер. Чрез тях бяха установени контакти и партньорства с работни групи и експерти от други звена. Получени бяха изключителен набор от знания за процесите на ЕЛПО, ЕЛЛ и ЕЛЗ. Получени за първи път бяха повърхностни покрития базирани на съединения на TiB₂ и TiC чрез иновационен подход с уникални механични свойства. Получени бяха редица знания за физичните процеси при заваряване на разнородни метали и сплави, като за първи път в световната литература успешно бе получено



високоякостно и високопластично заваръчно съединение между алуминиева сплав Al6082-T6 и титанова сплав Ti6Al4V. Бяха изготвени температурни модели описващи в детайли процесът на електроннолъчево заваряване. Бяха изследвани демпфериращите свойства на високоентропийни сплави и супер сплави. Получените резултати са от изключителна важност за световната литература и ще спомогнат бъдещето оптимизиране на процесите на електроннолъчева повърхностна обработка, електроннолъчево легиране и електроннолъчево заваряване, като се цели внедряването на тези резултати и в редица индустриални отрасли на местно и световно ниво.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Valkov S, Kotlarski G, Parshorov S, Ormanova M, Padikova F, Stoyanov B, Parshorov I. Electron Beam Surface Treatment and Its Impact on the Plasticity of Fe-Based High-Entropy Alloy. *Coatings* 2025; 15: 477.
- [2] Ormanova M, Dechev D, Ivanov N, Mihai G, Gospodinov M, Valkov S, Enachescu M. Synthesis and Characterization of Ti-Ta-Shape Memory Surface Alloys Formed by the Electron-Beam Additive Technique. *Coatings* 2022; 12: 678.
- [3] Kotlarski G, Kaisheva D, Ormanova M, Stoyanov B, Dunchev V, Anchev A, Valkov S. Improved Joint Formation and Ductility during Electron-Beam Welding of Ti6Al4V and Al6082-T6 Dissimilar Alloys. *Crystals* 2024; 14: 373.
- [4] Ormanova M, Kotlarski G, Stoyanov B, Valkov S. Surface modification of Ti6Al4V alloy by continuous electron beam. *Journal of Physics: Conference Series* 2023; 2487: 012037.
- [5] Ormanova M, Stoyanov B, Nedyalkov N, Valkov S. Impact of Beam Deflection Geometry on the Surface Architecture and Mechanical Properties of Electron-Beam-Modified TC4 Titanium Alloy. *Materials* 2023; 16: 5237.
- [6] Valkov S, Kotlarski G, Parshorov S, Ormanova M, Stoyanov B, Padikova F, Parshorov I. Effect of Electron Beam Surface Modification on the Plasticity of Inconel Alloy 625. *Coatings* 2024; 14: 268.
- [7] Valkov S, Padikova F, Parshorov S, Parshorov I. Crystallographic texture formation at Co-Cr-Mo alloys treated by a scanning electron beam. *Journal of Physics: Conference Series* 2025; 2994: 012029.
- [8] Ormanova M, Kotlarski G, Dechev D, Ivanov N, Stoyanov B, Valkov S. Duplex Surface Modification of M2 High-Speed Steel. *Coatings* 2024; 14: 798.
- [9] Padikova F, Nedeva D, Dunchev V, Stoyanov B, Ormanova M, Nedyalkov N, Valkov S. Fabrication and Characterization of Titanium Borides by Electron Beam Surface Alloying. *Coatings* 2023; 13: 1941.
- [10] Valkov S, Nedeva D, Dunchev D, Padikova F, Ormanova M, Stoyanov B, Nedyalkov N. Fabrication and Characterization of Ti/TiC Composite Layers by an Electron-Beam Surface Modification. *Coatings* 2023; 13: 951.
- [11] Kaisheva D, Anchev A, Dunchev V, Kotlarski G, Stoyanov B, Ormanova M, Valkov S. Electron-Beam Welding Cu and Al6082T6 Aluminum Alloys with Circular Beam Oscillations. *Crystals* 2022; 12: 1757.
- [12] Kaisheva, D, Anchev A, Valkov S, Dunchev V, Kotlarski G, Stoyanov B, Ormanova M, Atanasova M, Petrov P. Influence of Beam Power on Structures and Mechanical Characteristics of Electron-Beam-Welded Joints of Copper and Stainless Steel. *Metals* 2022; 12: 737.
- [13] Kotlarski G, Kaisheva D, Ormanova M, Stoyanov B, Dunchev V, Anchev A, Valkov S.



- Electron-Beam Welding of Titanium and Ti6Al4 Alloy. Metals 2023; 13: 1065.
- [14] Anchev A, Kaisheva D, Kotlarski G, Dunchev V, Stoyanov B, Ormanova M, Atanasova M, Todorov V, Daskalova P, Valkov S. Welding of Ti6Al4V and Al6082-T6 Alloys by a Scanning Electron Beam. Metals 2023; 13: 1252.
- [15] Kaisheva D, Angelov V, Petrov P. Simulation of heat transfer at welding with oscillating electron beam. Canadian Journal of Physics 2019; 97: 1140-1146.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ИЗСЛЕДВАНИЯ ВЪРХУ ЕЛЕКТРОННОЛЪЧЕВОТО ЗАВАРЯВАНЕ И ПОВЪРХНОСТНАТА МОДИФИКАЦИЯ НА МЕТАЛНИ СПЛАВИ В ЦЕНТЪРА ЗА КОМПЕТЕНТНОСТ „ИНТЕЛИГЕНТНИ МЕХАТРОНИКИ, ЕКО- И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“

ADVANCED RESEARCH DIRECTIONS IN ELECTRON BEAM WELDING AND SURFACE MODIFICATION OF METALLIC ALLOYS AT THE CENTRE OF COMPETENCE “SMART MECHATRONIC, ECO- AND ENERGY-SAVING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES“

**Stefan Valkov^{1,2,3}, Georgi Kotlarski^{1,3}, Nikolay Nedyalkov^{1,3}, Tatyana Koutzarova^{1,3},
Maria Ormanova^{1,2,3}, Borislav Stoyanov^{2,3}, Ivana Ilievska^{1,3}**

¹*Institute of Electronics, Bulgarian Academy of Sciences, 1784 Sofia, Bulgaria*

²*Technical University of Gabrovo, 5300 Gabrovo, Bulgaria*

³*Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"*

Abstract

This report outlines future research directions related to the application of electron beam technology for surface modification and welding of metallic materials and alloys. The focus is placed on the ability to precisely control microstructure and phase composition through the adjustment of technological parameters. The research will involve in-depth investigation of welded joints and surface-modified layers to determine their mechanical properties, wear resistance, residual stresses, and structural homogeneity. Special attention will be given to welding hard-to-join materials, as well as the development of composite coatings with enhanced functional characteristics. The expected results will contribute to expanding the understanding of electron beam interactions with materials and to the development of new engineering solutions with high added value.

Keywords: Electron beam welding; Surface modification; Microstructure; Mechanical properties; Process optimization.

ВЪВЕДЕНИЕ

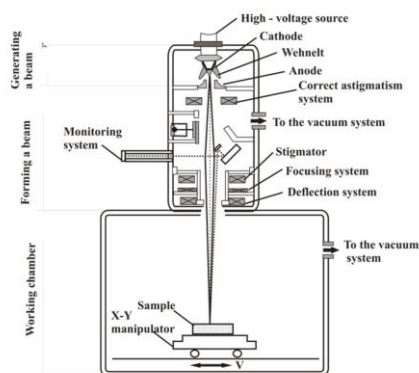
Въвеждането на нови технологии за производство на нови материали, както и за модифициране на тяхната структура и свойства, е от голямо значение. В момента методите за електронно-лъчева обработка са от особена важност и вече са успешно въведени в много индустриални отрасли, като например самолетостроенето и автомобилната промишленост, за производ-

ството на космически кораби, железопътни вагони и др. [1-6]. При тези техники материалите се обработват с високоинтензивен електронен лъч. Кинетичната енергия на електроните се превръща в топлина, което води до формиране на топлинно поле от повърхността към обема [7,8]. Скоростите на нагриване и охлаждане в тези случаи са доста високи, което води до промени в микроструктурата, химичния състав, топе-

не на повърхността и др. Технологичните условия могат да бъдат прецизно контролирани, което позволява прецизен контрол на структурата и свойствата на обработваните материали [9]. Някои предимства на тези технологии в сравнение с конвенционалните методи са както следва:

- Значително по-кратко време за обработка в сравнение с традиционните технологии;
- Равномерно разпределение на енергията на електронния лъч;
- Технологичните условия, определени от технологичните параметри, са силно възпроизводими.

Електроннолъчевите методи за повърхностна модификация на метали и сплави може да се използва в различни видове технологични процеси, такива като подобряване на механичните свойства чрез прилагане на едно- и многостепенни обработки на повърхността [11]; формиране на композитни повърхнинни структури и покрития [12]; електроннолъчево изпаряване и отлагане на тънки слоеве и филми [13]; заваряване и формиране на заваръчни съединения на еднородни и разнородни метали и сплави [14]. На фигура 1 е представена схема на електроннолъчева инсталация за повърхностна модификация и заваряване.



Фиг. 1. Схема на електроннолъчева машина за повърхностна модификация и заваряване [10].

Когато температурата на повърхността на детайла достигне стойност по-ниска от точката на топене на материала, обработената зона остава в твърдо състояние, но настъпват някои структурни промени и фазови трансформации. Този метод може да се използва най-вече за формиране на повърхнинни структури с подобрени механични характеристики [5]. В случай на достигане на точката на топене на образеца, обработената повърхност преминава в течно състояние, където могат да бъдат въведени модифициращи елементи. Тази техника се използва за формиране на композитни повърхностни структури и покрития. Също така, интензивното стопяване на материала е възможно да се реализира в голяма дълбочина. Това позволява много дълбоко заваряване на еднородни и разнородни метали и сплави с минимална ширина на заваръчния шев.

Целта на настоящия доклад е да обобщи тематиките, които се планира да бъдат развивани в Център за компетентност „Еко- и енергоспестяващи системи и технологии“, по специално в лаборатория С1.4 „Интелигентни технологии, базирани на интелигентни високи енергийни потоци“.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Част от експерименталната дейност е свързана с изследването на възможностите за получаване на заваръчни съединения между многокомпонентни сплави. За реализирането на тези научно-изследователски дейности ще се осъществяват изследвания, насочени към формиране на висококачествени заваръчни съединения между многокомпонентни сплави, както и между тях и други метали, чрез електроннолъчево заваряване. Дейностите включват детайлно изучаване на влиянието на технологичните параметри върху процеса на заваряване,



кристалографската структура и микро-структурата на съединенията, както и определяне на механичните им характеристики. Особено внимание се отделя на взаимовръзките между структурата и свойствата на получените заваръчни шевове, с акцент върху редуцирането на интерметални фази и пукнатини, които влошават експлоатационната надеждност на съединенията. Освен това се анализира влиянието на технологичните условия върху обработването, количеството и размера на интерметалните фази, както и върху остатъчните напрежения, с цел оптимизиране на процеса и повишаване на дълготрайността и механичната устойчивост на заварените конструкции.

Друга планирана научно-изследователска тематика в лаборатория С1.4 „Интелигентни технологии, базирани на високо интензивни потоци“ е свързана с формирането и характеризирането на композитни покрития на основата на титан и алуминий чрез електроннолъчева повърхностна модификация. Сред основните приоритети на лабораторията е разработване на технологии за значително подобряване на експлоатационните характеристики на алуминий и Al-базирани сплави. В основата на тази експериментална дейност ще бъде изследвано експериментално влиянието на технологичните условия при електроннолъчева повърхностна модификация върху свойствата и структурата на композитни покрития, получени върху алуминиеви сплави. Основен акцент се поставя върху изучаването на фазовия състав и микроструктурата на модифицираните слоеве в зависимост от условията на процеса. Ще бъдат провеждани експерименти за установяване влиянието на технологичните условия върху микротвърдостта и коефициента на триене на повърхностния слой, което има пряко значение за подобряване на износостойчивостта на алуминиевите сплави.

Допълнително се предвижда да се анализира формата и размерите на течната вана, възникваща при облъчване с електронен лъч, с цел да се изясни как различните технологични параметри влияят на дълбочината на модификация. Изследва се също механизмът на структурообразуване на композитните фази и разпределението на модифициращите елементи в покритието, което позволява по-добро разбиране на процесите на дифузия, реакция и фазова трансформация в зоната на модификация. Така се цели създаване на научно обосновани препоръки за оптимизация на електроннолъчевата повърхностна обработка с оглед повишаване на експлоатационните характеристики на алуминиеви сплави за инженерни приложения. Подобни експерименти се предвиждат за подобряване на експлоатационните характеристики на подложки от титан и титанови сплави, както и върху други метални материали имащи значително приложение в съвременната индустрия и практика.

Друга научно-изследователска тематика, която се планира да бъде разработвана в лаборатория С1.4 „Интелигентни технологии, базирани на високо интензивни потоци“ е свързана с разработването на нови технологии, базирани на обработка с високи енергийни потоци за получаване на тънки слоеве и филми от различни материали. Ще бъдат систематично изследвано влиянието на технологичните условия на процеса на електроннолъчева модификация върху възможностите за получаване на повърхностни структури от метални, керамични и други материали. Ще бъдат систематично изследвани и експлоатационните характеристики на получените повърхностни структури в зависимост от условията на получаване. Предвижда се разработените в лабораторията технологии да бъдат директно въведени за нуждите на съвременни индустриални отрасли.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Електроннолъчевата технология, с нейната висока прецизност, локализирано енергийно въздействие и възможност за работа във вакуум, продължава да бъде платформа с огромен научен и приложен потенциал както в сферата на заваряването, така и при повърхностната модификация на материали. Бъдещите изследвания в тази област следва да бъдат насочени към задълбочено изучаване на взаимовръзките между технологичните параметри и получената микроструктура, фазов състав, механични свойства и остатъчни напрежения. Особено внимание трябва да се отдели на създаването на функционални повърхности чрез електроннолъчева модификация, разработване на нови композитни покрития с повишена износоустойчивост, както и оптимизация на заваръчните процеси при труднозаваряеми материали и разнородни съединения. Така, чрез интердисциплинарни изследвания, се откриват нови възможности за развитие на високотехнологични инженерни решения в ключови отрасли като авиация, енергетика, медицина и микроелектроника.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Yusuf, S.; Cutler, S.; Gao, N. Review: The Impact of Metal Additive Manufacturing on the Aerospace Industry. *Metals* **2019**, *9*, 1286.
- [2] Portoles, L.; Jorda, O.; Jorda, L.; Uriondo, A.; Esperson-Miguez, M.; Perinpanayagam, S. A qualification procedure to manufacture and repair aerospace parts with electron beam melting. *J. Manuf. Syst.* **2016**, *41*, 65–75.
- [3] Juechter, V.; Franke, M.; Merenda, T.; Stich, A.; Korner, C.; Singer, R. Additive manufacturing of Ti-45Al-4Nb-C by selective electron beam melting for automotive applications. *Addit. Manuf.* **2018**, *22*, 118–126.
- [4] Murr, L.; Gaytan, S.; Ceytan, A.; Martinez, E.; Martinez, J.; Hernandez, D.; Machado, B.; Ramirez, D.; Medina, F.; Collins, S.; et al. Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting. *Acta Mater.* **2010**, *58*, 1887–1894.
- [5] Weglowski, M. Electron beam rapid prototyping using wires and modification of the surface. In *Manufacturing Techniques for Materials: Engineering and Engineered*, 1st ed.; Srivatsan, T., Sudarshan, T., Manigandan, K., Eds.; Taylor and Francis Group: Boca Raton, FL, USA, 2018; pp. 133–160.
- [6] Weglowski, M.; Blacha, S.; Philips, A. Electron beam welding-Techniques and trends-Review. *Vacuum* **2016**, *130*, 72–92.
- [7] Schultz, H. *Electron Beam Welding*; Abington Publishing: Cambridge, UK, 1993.
- [8] Petrov, P.; Tongov, M. Numerical modelling of heat source during electron beam welding. *Vacuum* **2020**, *171*, 108991.
- [9] Kaisheva, D.; Angelov, V.; Petrov, P. Simulation of heat transfer at welding with oscillating electron beam. *Can. J. Phys.* **2019**, *97*, 1140–1146.
- [10] Valkov, S.; Ormanova, M.; Petrov, P. Electron-Beam Surface Treatment of Metals and Alloys: Techniques and Trends. *Metals* **2020**, *10*, 1219.
- [11] Ormanova, M.; Kotlarski, G.; Dechev, D.; Ivanov, N.; Stoyanov, B.; Valkov, S. Duplex Surface Modification of M2 High-Speed Steel. *Coatings* **2024**, *14*, 798.



- [12] Padikova, F.; Nedeva, D.; Dunchev, V.; Stoyanov, B.; Ormanova, M.; Nedyalkov, N.; Valkov, S. Fabrication and Characterization of Titanium Borides by Electron Beam Surface Alloying. *Coatings* **2023**, *13*, 1941.
- [13] Rabadzhiyska, S.; Kotlarski, G.; Shipochka, M.; Rafailov, P.; Ormanova, M.; Strijkova, V.; Dimcheva, N.; Valkov, S. Duplex Surface Modification of 304-L SS Substrates by an Electron-Beam Treatment and Subsequent Deposition of Diamond-like Carbon Coatings. *Coatings* **2022**, *12*, 401.
- [14] Kotlarski, G.; Kaisheva, D.; Ormanova, M.; Atanasova, M.; Anchev, A.; Dunchev, V.; Stoyanov, B.; Valkov, S. Electron Beam Welding of Dissimilar Ti6Al4V and Al6082-T6 Alloys Using Magnetron-Sputtered Cu Interlayers. *Crystals* **2025**, *15*, 373.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ИЗСЛЕДВАНЕ НА МИКРОСТРУКТУРАТА СЛЕД ЕЛЕКТРОННО ЛЪЧЕВО ЗАВАРЯВАНЕ НА КОВЪК ЧУГУН И НЕРЪЖДАЕМА СТОМАНА 316L

INVESTIGATION OF THE MICROSTRUCTURE AFTER ELECTRON BEAM WELDING OF DUCTILE CAST IRON AND AISI 316L STAINLESS STEEL

by

Milka Atanasova^{1,2}, Vladimir Todorov^{1,2}, Marieta Ivanova^{1,2}, Vladimir Dunchev^{1,2}

¹Department of Material Science and Mechanics of Materials, Technical University of Gabrovo,
5300 Gabrovo, Bulgaria

²Center of Competence “Smart Mechatronic, Eco- and Energy-Saving Systems and Technologies”,
Technical University of Gabrovo, 5300 Gabrovo, Bulgaria

Abstract

The welded interface between ductile cast iron with spheroidal graphite (DCI) and AISI 316 stainless steel produced by electron beam (EB) treatment was investigated using scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX). Results reveal significant compositional heterogeneity across the fusion zone, with distinct regions of Fe-rich matrix, Cr- and Mo-enriched precipitates, and graphite degradation. These features suggest dilution-driven microsegregation and secondary phase formation, with implications for corrosion resistance and mechanical performance.

Keywords: ductile cast iron with spheroidal graphite, stainless steel, Scanning Electron Microscope (SEM), microstructure.

INTRODUCTION

Cast iron castings are composed primarily of iron, carbon and silicon, which favor the formation of graphite [1]. In practice, castings with a carbon content of about 4% are used, since its greater percentage leads to an increase in the fragility of the material. Alloys produced by casting are generally neither ductile nor malleable. The BDS EN 1563:2019 standard defines ductile iron as “a cast material based on iron, carbon and silicon, in which the carbon is

predominantly in the form of spheroidal particles” [2].

The classification depends on the metallographic structure and the percentages of carbon, alloying elements and impurities. The poor mechanical properties of some castings are due to the presence of graphite flakes, which create discontinuities in the matrix and thus lead to the presence of stress concentrators. These alloys have a high carbon content, which makes them difficult to weld due to the formation of martensite and

brittle iron carbides during the cooling process of the joint. Therefore, welding of cast iron usually involves repair operations, rather than joining separate castings [1-2].

In order to create a monolithic joint, the use of filler is resorted to, reducing the cooling rate of the weld to reduce martensitic transformations and carbide precipitates that would easily lead to cracking of the joint [1].

In recent years, electron beam welding (EBW) has established itself as one of the methods of welding uniform and dissimilar materials [3]. The process is carried out in a vacuum, in which the shrinkage of the material is very minimal, there is no oxides or nitrides contamination. The resulting weld seam is almost free of defects. Despite the many positives of this type of welding, a significant disadvantage remains the possibility of combining certain heterogeneous materials. Weglowski [4-5] generally presents possible combinations of electron beam weldable materials with the inclusion of some steels and non-ferrous metals.

Another major problem in fusion welding of dissimilar materials arises from the fact that there is a difference in: melting points, coefficients of thermal conductivity and thermal expansion, as well as the high cooling rate. These are also part of the reasons why it is not possible to obtain a monolithic joint between two dissimilar materials. According to [6-7] the best way to prevent the presence of defects is to apply pre- and post-heating. Depending on the temperature of preheating, the following basic methods of welding cast iron are distinguished:

- hot welding, with heating temperature of 600-650 °C;
- semi-hot welding, with a heating temperature of 300-400 °C;
- cold welding - without preheating.

In [3] electron beam welding of dissimilar materials was carried out: 316L and carbide-

bainite cast irons. Based on the conclusions made in this article, the two materials were selected, namely: AISI 316 stainless steel and DCI. The purpose of the present publication is to study the change in the microstructure of the selected dissimilar materials obtained after electron beam welding.

MATERIALS AND METHODS

- *Materials*

For the implementation of the electron beam welding process, two dissimilar materials have been selected: ductile cast iron (DCI) and AISI 316 stainless steel. The DCI blanks were obtained using the hot wax casting method, with the resulting structure of the metal matrix being ferritic with graphite inclusions and primary carbides due to alloying with 15% ferrobore (FeB15) in amounts up to 0.1% (fig. 1) [8-9].

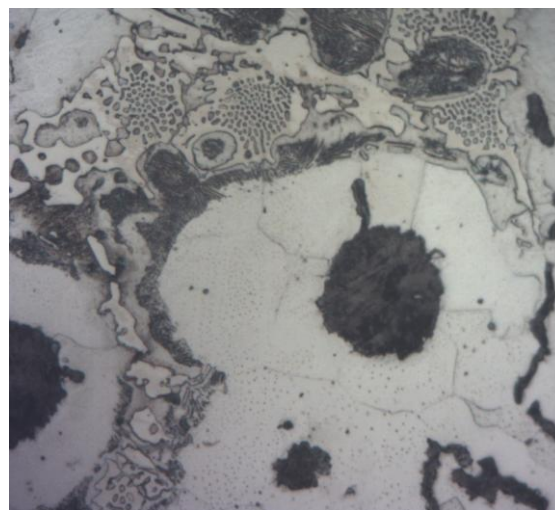


Fig.1. Microstructure of the ductile cast iron with spheroidal graphite used in the study x500

Both materials have the chemical composition indicated in Table 1, with AISI 316 stainless steel being in the as-delivered condition according to [9], and the DCI being after the casting process.

Table 1 Chemical composition

Mat.	C, %	Si, %	Mn, %	Ni, %	B, %	Cr, %
DCI	3,52	2,27	0,032	0,03	0,135	-
316L	0,03	0,75	2,0	10,0- 14,0	-	16,0- 18,0

The blanks from both materials have been turned and have a length of $l = 50\text{mm}$ and a square cross-section with a side length of $a = 10\text{mm}$ (fig. 2).

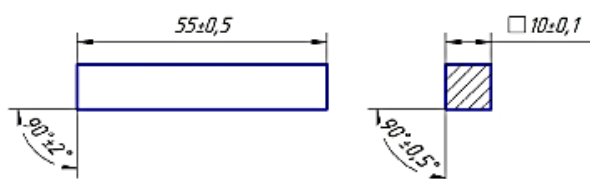


Fig. 2. Geometric dimensions of blanks from DCI and austenitic stainless steel AISI 316L

• Methods

The EBW was carried out using an Evobeam Cube 400 welding unit manufactured by Evobeam and the welding mode are specified in table 2.

Table 2. Technological parameters of EBW

Accelerati ng voltage U, kV	Welding speed V, mm/min	Beam current I _b , mA	offset	Focusing current I _c , mA	Radius of oscillation
60	400	20	0,20 (steel)	1510 (surface)	0,15

After welding, a metallographic section was made from the resulting monolithic compound, which was developed in a solution of nitric and hydrochloric acid in a ratio of 3:1.

A scanning electron microscope Zeiss Evo 10 was used to perform quantitative analysis.

RESULTS AND DISCUSSIONS

The observation of the resulting microstructure was initially carried out using an optical microscope. Due to the low magnification

(Fig. 3), only the clearly delineated areas of the two materials, the resulting high-quality weld seam, and the shape and type of the resulting structures can be seen.

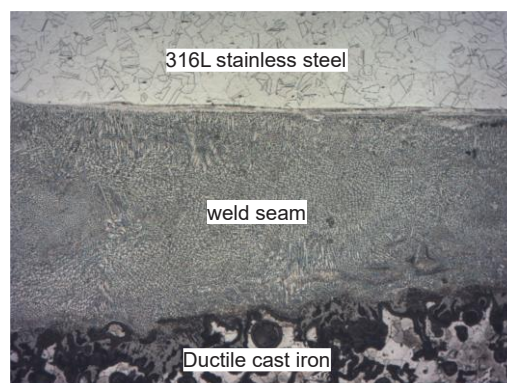


Fig. 3. Microstructure of the weld joint by optical microscope

The determination of the chemical composition and structure in the transition zones between the weld seam and the materials (heat affected zone), as well as in the welding zone itself (fusion zone), is carried out using a scanning electron microscope (SEM) (Fig. 4-6).

Secondary electrons (SE) were used to obtain the final image. In this way, the surface topography of the resulting weld joint is seen in more detail. From Fig. 4 and Fig. 6 it can be clearly seen that the width of the HAZ zone is almost the same.

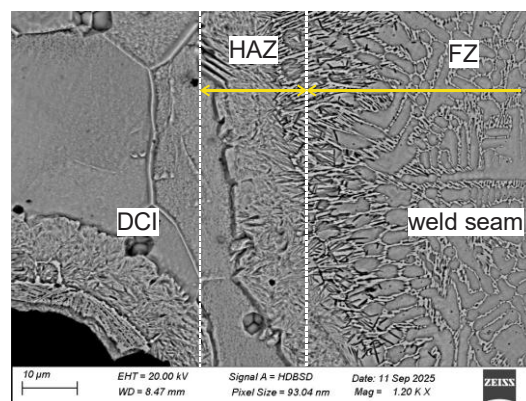


Fig. 4. Microstructure between DCI and weld seam by SEM

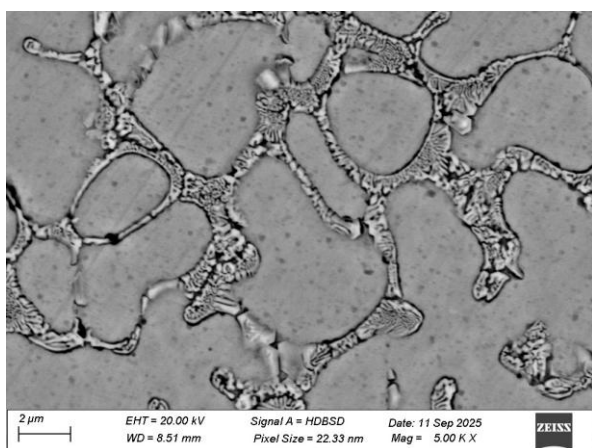


Fig.5. Microstructure of the weld seam by SEM

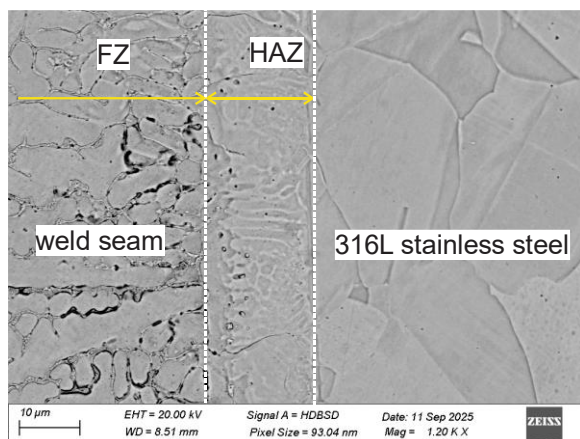


Fig.6. Microstructure between 316L stainless steel and weld seam by SEM

SEM Observations

- SE images at $\times 150$ revealed heterogeneous morphology across the weld. The DCI side exhibited partially dissolved graphite nodules and coarse Fe-rich matrix regions, while the AISI 316 side displayed a more uniform grain structure with relief at grain boundaries.

- Backscattered electron (BSE) images highlighted compositional contrast. Darker regions corresponded to Fe-rich phases, while brighter features were observed at grain boundaries and within the fusion zone, indicating Cr/Mo-rich precipitates (Fig. 5). Graphite nodules appeared as dark inclusions,

some surrounded by reaction layers.

Energy dispersive spectroscopy (EDX) in combination with SEM was used to determine the chemical composition of the studied sample (Fig. 7).

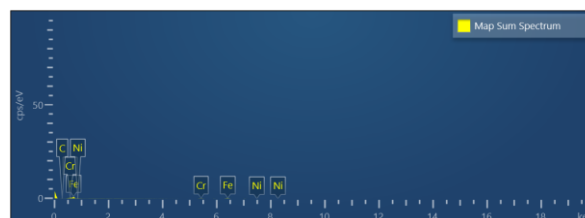


Fig.7. Microstructure between DCI and weld seam by SEM

The values obtained from the measurement are recorded in tabular form (Table 3).

Table 3 Map Sum Spectrum

Element	Weight %
C	3.21
Cr	22.05
Fe	65.46
Ni	9.28
Total	100.00

Figure 7 demonstrates that electron beam welding induced extensive mixing and dilution across the weld interface. Rapid cooling promoted microsegregation:

- Cr/Mo enrichment at boundaries produced bright precipitates in BSE, likely carbides $(M)_{23}C_6$ or complex oxides.
- Cr-depleted Fe-rich regions adjacent to enriched zones may compromise localized corrosion resistance, acting as sensitization sites.
- Graphite destabilization in the DCI HAZ led to partial dissolution and carbon transfer, enhancing carbide formation with Cr and Mo.
- Ni content was lower than nominal AISI 316, reflecting dilution by Fe from cast iron.

These observations indicate a microstructure with heterogeneous mechanical and electrochemical behavior: hard, brittle Cr/Mo-



rich phases embedded in a softer Fe-rich matrix, alongside areas prone to corrosion.

CONCLUSION

The following conclusions can be drawn from the observations of the resulting microstructure of a weld seam obtained by electron beam welding of dissimilar materials - DCI and AISI 316L stainless steel:

- *When determining the chemical composition with the combination of EDX and SEM:*

- The electron beam welded interface between DCI and AISI 316L stainless steel shows a highly heterogeneous microstructure with Fe-rich zones, Cr/Mo-rich precipitates and degraded graphite nodules.

- EDX confirms compositional gradients consistent with dilution and segregation.

- The microstructural features suggest a risk of localized corrosion and embrittlement in the HAZ.

- Future work should include SEM/EDS mapping at higher magnification, carbide identification and hardness/corrosion testing.

From the SEM analysis: it can be seen that resulting structure in the FZ is dendritic, with three clearly defined zones: of crystallites, elongated dendritic crystals and large equiaxed dendrites with different orientations.

Acknowledgements

This study was supported by the European Regional Development Fund under the Operational Programme "Research, Innovation and Digitalization for Smart Transformation" 2021-2027, Project No. BG16RFPR002-1.014-0005 Center of Competence "Smart mechatronic, eco- and energy-saving systems and technologies."

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Cárcel-Carrasco F-J, Pérez-Puig M-A, Pascual-Guillamón M, Pascual-Martínez R. An Analysis of the Weldability of Ductile Cast Iron Using Inconel 625 for the Root Weld and Electrodes Coated in 97.6% Nickel for the Filler Welds. *Metals*. 2016; 6(11):283. <https://doi.org/10.3390/met6110283>
- [2] Francisco-Javier Cárcel-Carrasco, Miguel-Angel Pérez-Puig, Manuel Pascual-Guillamón and Rafael Pascual-Martínez. An Analysis of the Weldability of Ductile Cast Iron Using Inconel 625 for the Root Weld and Electrodes Coated in 97.6% Nickel for the Filler Welds. *Metals* 2016, 6, 283; doi:10.3390/met6110283
- [3] Atanasova M. Weldability of AISI 316L Stainless Steel and Carbide Austempered Ductile Iron Using Electron Beam Welding Technology. *Environment. Technology. Resources. Rezekne, Latvia Proceedings of the 16th International Scientific and Practical Conference*. 2025. Volume IV, 23-27
- [4] M. St. Węglowski, S. Błacha, A. Phillips, "Electron beam welding – Techniques and trends – Review", *Vacuum*, vol. 130, pp. 72-92, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2016.05.004>.
- [5] Z. Sun and R. Karppi, "The application of electron beam welding for the joining of dissimilar metals: an overview", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 59, Issu 3, pp. 257-267, 1996, [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)02150-7](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)02150-7).
- [6] www.castingarea.com
- [7] D.Q. Sun, X.Y. Gu, W.H. Liu, Z.Z. Xuan, "Welding consumable research for austempered ductile iron (ADI)", *Materials Science and Engineering*, vol. 402, Issues 1–2, pp. 9-15, 2005, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.01.034>.
- [8] Todorov V. Bainite Ductile Cast Irons-possibilities and problems. XIII International scientific and technological conference, Issue 7 (193), 2016, ISSN 1310- 3946
- [9] Rashev G., M. Svilenov, V. Todorov at all. Boron in ductile cast irons. *International virtual journal for science, technology, innovations for industry. Machines, Technologies, materials*, year VI, Issue 3/2012, ISSN 1313-0226 <https://www.upmet.com/sites/default/files/datasheets/316-316L.pdf>



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ АЕРОДИНАМИЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ С PIV МЕТОДИ

EXPERIMENTAL AERODYNAMIC STUDIES WITH PIV METHODS

Hristian Panayotov

*Department of Transport
and Aeronautical Engineer-
ing*

*Technical University of So-
fia, Plovdiv Branch
Plovdiv, Bulgaria*

hristian@tu-plovdiv.bg

Stanimir Penchev

*Department of Transport
and Aeronautical Engineer-
ing*

*Technical University of So-
fia, Plovdiv Branch
Plovdiv, Bulgaria*

spenchev@tu-plovdiv.bg

Martin Zikyamov

*Department of Transport
and Aeronautical Engineer-
ing*

*Technical University of So-
fia, Plovdiv Branch
Plovdiv, Bulgaria*

mzikyamov@tu-plovdiv.bg

*Technical University of Sofia, Plovdiv Branch,
Technical University of Sofia, Plovdiv Branch, Center of Competence "Smart mechatronic, eco-
and energy-saving systems and technologies"*

Abstract:

Determining the aerodynamic characteristics of aircraft when conducting experimental studies in wind tunnels is a traditional approach that finds application in the present as well. The development of innovative technical equipment and research methods creates new opportunities in various fields of application. The report presents the equipment of the Autonomous Aircraft Laboratory. A main focus of the research is the use of a laser optical system (PIV) to determine the velocity field and other flow parameters in the test section of the wind tunnel. The results of various studies, which are indicative of the application possibilities of this system, are presented. One such case is the study of the flow in the wake behind a wing-body model.

Keywords: *particle image velocimetry, digital image correlation,*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

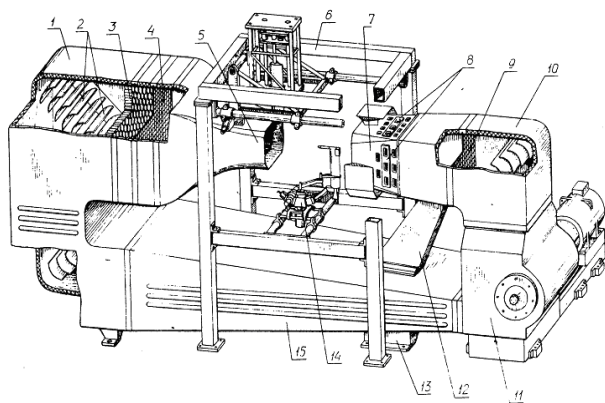
Изследването в аеродинамична тръба е един от най-достоверните, а в някой случай е единственият възможен начин за определяне на аеродинамичните характеристики на модели на Летателни Апарати (ЛА). Експерименталните измервания играят важна роля за потвърждаване на резултатите от симулациите, а и за получаване на нови, които са сложни за симули-

ране [1]. За да се получат точни резултатите, е необходимо да се сравнят аеродинамичните характеристики на модела в аеродинамичната тръба с характеристиките на ЛА, летящ в атмосферата. при различни режими на полета.

Particle image velocimetry (PIV) е оптичен метод за изобразяване на течението и изследване на динамиката на флуидите. PIV осигурява детайлни измер-

вания на големината на скоростта, векторите на скоростта и свързаните с тях свойства на флуидите. Във флуида се добавят „индикаторни“ частици, които са достатъчно малки и се приема, че точно следват динамиката на течението. След това флуидът и частиците се осветяват така, че частиците да станат видими, като движението им се използва за определяне на скоростта и направлението (скоростното поле) на изследваното течение [2, 3].

Лабораторната установка за PIV експеримент обикновено се състои от една или две цифрови CCD или CMOS камери; лазер с оптично устройство за ограничаване на осветяваната област – цилиндрична леща, която преобразува светлинния лъч в равнина; синхронизатор, който да действа като външен тригер за управление на камерата, лазера, устройството, разпръскващо частиците, и изследвания флуид. За допълнително обработване на получените изображения се използва специализиран PIV софтуер.



Фиг. 1, УЛАК-1

PIV системата е монтирана на съществуваща аеродинамична тръба УЛАК-1 (Фигура 1), разположена в Лаборатория 8.3 „Автономни летателни апарати“, показан фигури 2 и 3.

1.1. 2D PIV

2D PIV е метод за визуализиране на двумерни векторни скоростни полета на флуидно течение чрез обработка на цифрови изображения на добавените във флуидното течение „индикаторни“ частици. Информацията за скоростта на частиците се получава като се измерва тяхното преместване за даден интервал от време.



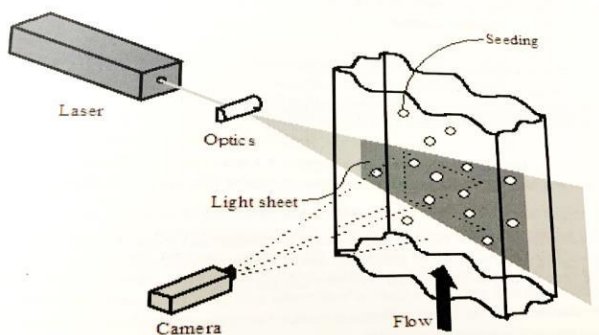
Фиг. 2, PIV система



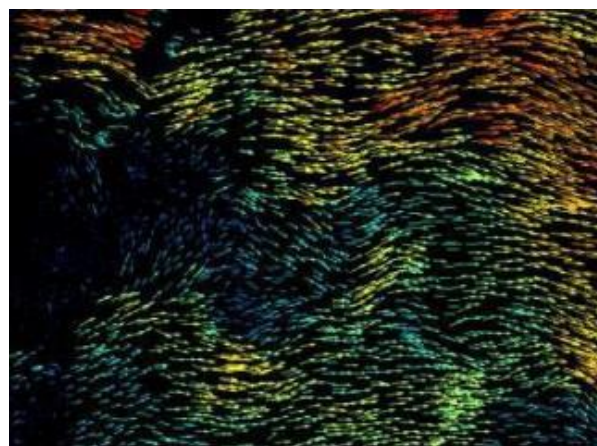
Фиг. 3, PIV система по време на заснемане

Преместването на частиците се изчислява за определена област от течението, която се осветява от лазер, (Фигури 4 и 5). Местоположението на осветените частици във флуидното течение се заснема от цифрова камера, като оптичната ос на обектива ѝ е разположена перпендикулярно на равнината на лазерното излъчване. Аперту-

рата на камерата е настроена така, че на черен фон да се виждат само частиците в потока във вид на светли петна. Също така лазерът и камерата са синхронизирани с помощта на специализиран синхронизиращ модул така че частиците, осветени в момента на импулс 1, са заснети на изображение 1, а частиците, осветени в момента на импулс 2, са заснети на изображение 2. При последващата цифрова обработка на получените данни, снимките се разделят на зони на интерес с размери $M \times N$ пиксела. Всяка от тези зони се корелира от изображение - 1 и изображение - 2, за да се получи векторът на средното преместване на частиците. По този начин се получава векторна карта на средното преместване на частиците за всяка област на интерес. Преместванията на частиците, измервани в пиксели, се преобразуват във физична величина – дължини в mm. Те се разделят на времето, измервано в секунди, между две заснети изображения. По този начин векторите на преместването се конвертират в карта на raw-вектори на скоростта (raw velocity vectors). След това, с цел подобряване на качеството на получените резултати от проведеното PIV измерване, към получената векторна карта се прилагат специални алгоритми за валидиране, които откриват, премахват или по възможност модифицират/възстановяват грешни вектори съгласно различни цифрови подходи.



Фиг. 4 - Схема на 2D PIV измерване



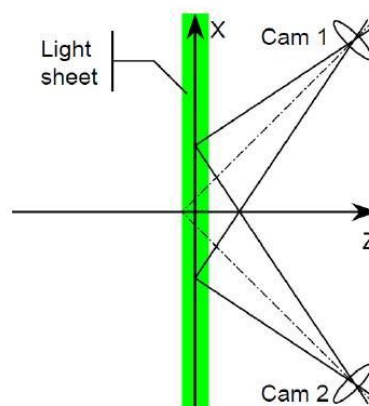
Фиг. 5 - Примерна векторна карта

1.2. Stereo PIV

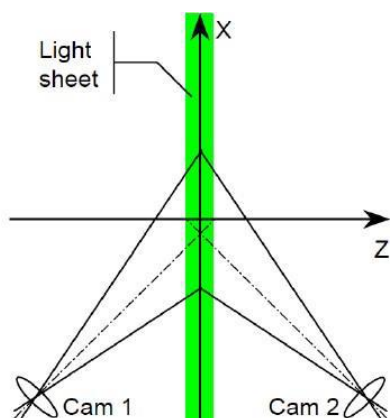
В конфигурацията на стерео PIV системата, за разлика от двумерната, влизат две CCD или CMOS цифрови камери, като всяка камера „вижда“ флуидното течение под различен ъгъл.

На фигури. 6 и 7 схематично са показани два варианта на разположение на камерите при стерео PIV измервания.

Стерео измерванията започват със стандартна 2D PIV обработка на PIV изображенията, записани едновременно от двете камери. В резултат на това се получават две 2D векторни карти, представящи полето на течението в даден момент без да е извършена корекция по зрителен ъгъл, т.е. както се „вижда“ от камерите.

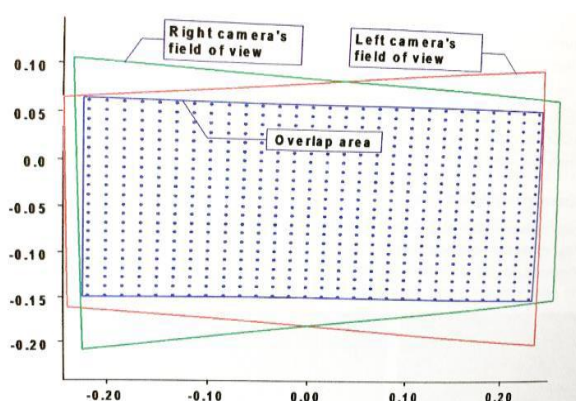


Фиг. 6. Едностранно разположение на камерите.



Фиг. 7. Двустранно разположение на камерите.

Използвайки предварително получени калибровъчни изчисления, двете 2D векторни карти се обединяват в една стерео векторна карта, (Фигура 8).



Фиг. 8 Калибровъчна карта

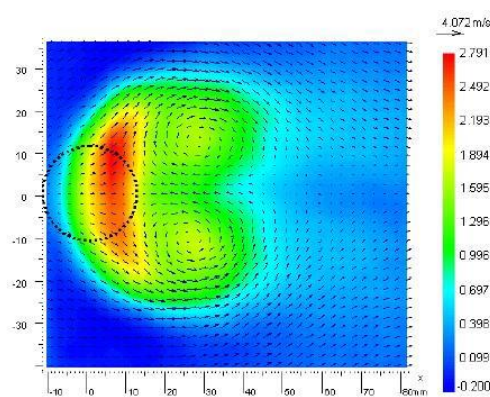
Стерео измерванията започват със стандартна 2D PIV обработка на PIV изображенията, записани едновременно от двете камери. В резултат на това се получават две 2D векторни карти, представящи полето на течението в даден момент без да е извършена корекция по зрителен ъгъл, т.е. както се „вижда“ от камерите.

Използвайки предварително получени калибровъчни изчисления, двете 2D

векторни карти се обединяват в една стерео векторна карта, (Фигура 8).

В границите на областта на припокриване се избират области на интерес под формата на правоъгълна мрежа.

В триизмерната векторна карта третата координата на скоростта, която е перпендикулярна на равнината на лазерното излъчване, е представена в определен цвят на фона, който съответства на определен скоростен диапазон (Фигура 9).



Фиг. 9 - 3D векторна карта на скоростите във флуидно течение

ИЗЛОЖЕНИЕ

За провеждането на експериментални изследвания се изработват модели в умален мащаб. Мащабът се обуславя от напречното сечение на работната част на аеродинамичната тръба – максимално допустимата разпереност на модела е 400 mm, а максималната площ на напречното сечение е 1800 mm². За да се осигури надеждното закрепване на модела към вътрешните аеродинамични везни е проектирана специална опора. Основните изисквания към опората са: минимално вредно съпротивление; минимална интерференция с модела; минимално напречно сечение; максимална здравина и якост.

Моделите на Безпилотни Летателни Апарати (БЛА), полукрило и опората са показани на Фигури 10, 11 и 12.



Фиг. 10 Модел на БЛА 1:10



Фиг. 11 БЛА монтиран на α - β механизма



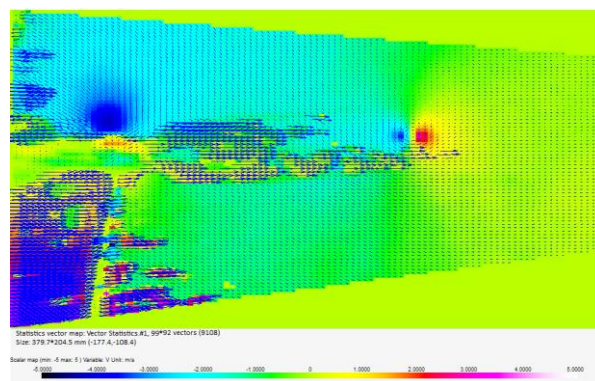
Фиг. 12 Стенд за изпитване на витла

Експериментът се провежда в аеродинамична тръба УЛАК-1 с открита работна част и изследователска станция със затворен цикъл на работа. Максималната скорост на въздушния поток, която може да се постигне в аеродинамичната тръба, е 50 m/s.

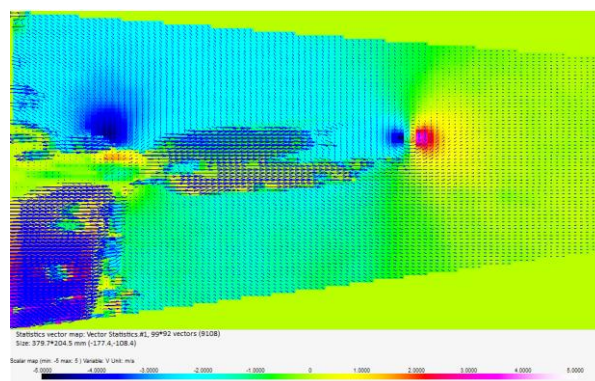
Размерите на напречното сечение на работната част са 600x400 mm. Аеродинамичните сили и моменти се измерват с помощта на шесткомпонентни тензометрични аеродинамични везни. Ъгълът на атака и ъгълът на плъзгане се контролират с α - β механизъм. Допълнително в работната част на аеродинамичната тръба може да бъде поставен и стенд за изпитване на витла.

От проведени измервания с описаната PIV-система в аеродинамична тръба УЛАК-1 са получени резултати за разпределението на налягането и скоростта в работната част - във вид на скаларно и векторно поле на модела, както и на зави-хреността ($\nabla \times \vec{V}$)

На фигури 13 и 14 е показана вихрова система в равнина на Трефтц на крило с уинглети на различни ъгли на атака.

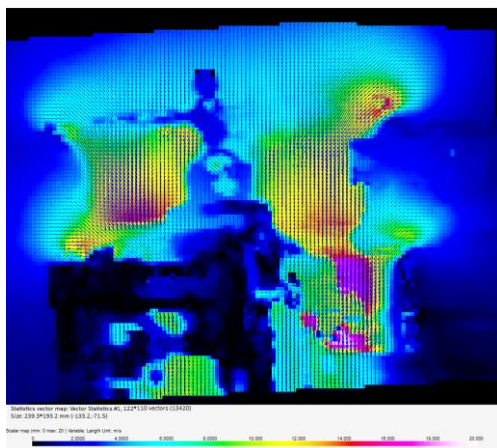


Фиг.13 Ъгъл на атака 6°

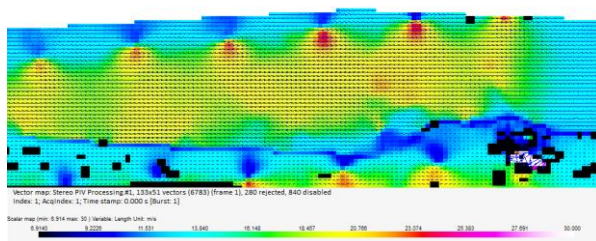


Фиг.14 Ъгъл на атака 8°

На Фигури 15 и 16 са показани измервания на крило-витло от VTOL БЛА в режими на висене и хоризонтален полет.



Фиг. 15 Скоростно поле при вертикален полет



Фиг. 16 Скоростно поле при хоризонтален полет

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Размерът на глобалните пазари за градска въздушна мобилност се очаква да нарасне от 3,8 милиарда щатски долара през 2023 г. до 28,5 милиарда щатски долара до 2030 г. Създаването се движи от фактори като нарастващи инициативи за интелигентни градове, нарастване на опасенията за околната среда и нарастващ напредък в технологиите. Пловдив е такъв инициативен интелигентен град с план за градска въздушна мобилност с добре изградена естествена вертикална инфраструктура.

Монтираната в лаборатория 8.3 „Автономни летателни апарати“ PIV система, значително разширява възможности-

те на съществуващото оборудване. Новите технически средства, методите и алгоритмите за комплексни изследвания на автономни летателни апарати дават възможност за съвместна работа с предприятия от авиационната индустрия за проектиране и производство, на пилотирани и безпилотни летателни апарати. Особен интерес представляват летателните апарати с вертикално излитане и кацане подходящи за градска въздушна мобилност и БЛА с специализирано предназначение.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

1. J. B. Barlow, W.H. Rae, Jr. and A. Pope, *Low-speed wind tunnel testing* (John Wiley & Sons Inc., New York, 1999).
2. “2D PIV. Reference Manual”, Publication no.: 9040U1753 (Dantec Dynamics A/S, Skovlunde, Denmark, 2016).
3. “Stereo PIV. Reference Manual”, Publication no.: 9040U4117 (Dantec Dynamics A/S, Skovlunde, Denmark, 2017).
4. S.I. Penchev, D.S. Kolibarov and D.T. Seyzinski, “Research of the characteristics of the flow in the work section of the wind tunnel UT-1”, *Mech. of Machines*, **62**, 0861-9727 (2006), pp. 9-12.
5. *Wind Tunnel Testing*, John Wiley & Sons, Inc., 1999.
6. Raffel, M., Willert, C., Wereley, C., Kompenhans, J. *Particle Image Velocimetry. A Practical Guide*, Springer, 2007.
7. Schroeder, A., Willert, C., *Particle Image Velocimetry. New Developments and Recent Applications*, Springer, 2008.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

КООРДИНАТНИ ИЗМЕРВАНИЯ И МЕТОДИ ЗА КОМПЕНСАЦИЯ НА ГРЕШКИ ПРИ ИНДУСТРИАЛНИ ПРИЛОЖЕНИЯ

COORDINATE MEASUREMENTS AND ERROR COMPENSATION METHODS IN INDUSTRIAL APPLICATIONS

Dimitar Dichev

Technical University of Gabrovo

Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Iliya Zhelezarov

Technical University of Gabrovo

Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Borislav Georgiev

Technical University of Gabrovo

Tsanko Karadzhov

Technical University of Gabrovo

Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract

The article presents an integrated approach to increasing the accuracy of coordinate measurements by combining measuring systems and algorithms for error compensation. The methodology is based on the predictor-corrector principle and minimization of the mean square error. The experimental verification with plane reference details on a bench-simulator reproducing vibration effects typical for a production environment shows a decrease in the average deviation and standard deviation of measurements. The results confirm the effectiveness and applicability of the method in industrial conditions with high requirements for accuracy and reliability.

Keywords: multi-sensor coordinate measuring system; mobile measuring arm; error compensation; predictor–corrector algorithm; accuracy of coordinate measurements; metrology.

ВЪВЕДЕНИЕ

Прецизните измервания са основен фактор за качеството и конкурентоспособността на съвременното машиностроително производство [1,2]. Координатните измервателни машини и мултисензорните системи са сред най-широко използваните средства за осигуряване на геометрична точност, тъй като позволяват комплексен анализ на формата, разположението и раз-

мерите на изделията [3]. Тяхното приложение обхваща не само контрола на готовата продукция, но и мониторинга на технологичните процеси, както и калибрирането на средствата за измерване.

Нарастващите изисквания към точността на детайлите поставят предизвикателства пред измервателните системи, които често работят в динамични условия, далеч от идеализираната лабораторна среда [4,5]. В ре-



алните производствени среди измерванията са повлияни от вибрации, механични въздействия, температурни промени и електромагнитни смущения. Тези фактори водят до различни видове грешки – систематични и случайни, статични и динамични – които могат да компрометират достоверността на резултатите [6-10].

В този контекст възниква необходимостта от методи за компенсация на грешки, които да повишават точността и надеждността на координатните измервания [11-14]. Развитието на математически модели, алгоритми за обработка на данни и интегрирането на допълнителни сензорни системи създават условия за преодоляване на ограниченията на класическите измервателни подходи. В последните години особено внимание се отделя на техники за корекция на динамични грешки и за адаптиране на измервателните процедури към реалните условия на експлоатация [15-17].

Целта на настоящата статия е да представи съвременни измервателни системи и подходи за компенсация на грешки, приложими при координатни измервания в индустриална среда. Акцентът е поставен върху комбинирането на мултисензорни технологии с алгоритми за корекция, което осигурява висока точност и възможност за надежден контрол на изделия и процеси в условия, близки до реалното производство.

МЕТОДИ ЗА КОМПЕНСАЦИЯ НА ГРЕШКИ ПРИ КООРДИНАТНИ ИЗМЕРВАНИЯ

Видове грешки и тяхното влияние в индустриална среда

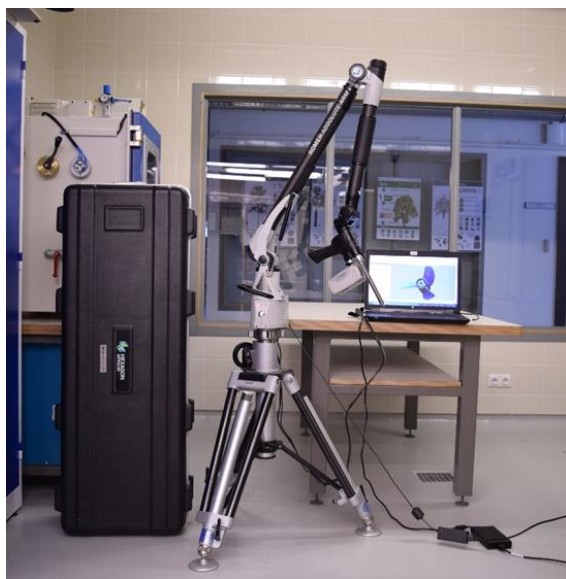
При координатните измервания точността и надеждността на резултатите се определят от съвкупността на грешките, възникващи в процеса на измерване. В индустриалната практика тези грешки могат да бъдат класифицирани в няколко основни групи:

- **Геометрични грешки на измервателната система** – породени от неточности в направляващите, изкривявания на координатните оси или несъвършенства в калибрирането. Те водят до систематични отклонения, които могат да се проявят при измерване на сложни геометрии.
- **Инструментални грешки** – свързани с чувствителността и стабилността на сензорите (тактилни, оптични, лазерни, хроматични и др.). Тези грешки често зависят от характеристиките на повърхността на обекта (грапавост, отражателни свойства) и от условията на работа.
- **Динамични грешки** – възникват при наличие на вибрации, ускорения и удари, които влияят върху подвижните части на измервателната система. В реалните производствени среди те са особено съществени, тъй като често се появяват в резултат от работата на тежки машини, транспортни системи или външни въздействия.
- **Влияния на средата** – температурни изменения, влажност и електромагнитни смущения, които могат да предизвикат деформации на измервателните средства или нестабилност в електронните компоненти.

Влиянието на грешките в индустриална среда е значително по-голямо в сравнение с лабораторни условия, където факторите са контролирани. Ето защо класическите статични модели за оценка на точността са недостатъчни – необходимо е прилагане на методи за компенсация, които да осигурят корекция на измерванията в реално време или при последваща обработка на данните.



Фиг. 1. Мултисензорна координатна измервателна система с оптични, тактилни, лазерни и хроматични датчици за прецизни измервания.



Фиг. 2. Преносима координатна ръка с интегриран лазерен скенер за измервания в лабораторни и индустриални условия.

За да се илюстрира практическата основа на тези предизвикателства, на фиг. 1 е показана мултисензорна координатна измервателна система, а на фиг. 2 – измерва-

телна ръка с интегриран скенер. Първата система демонстрира широк спектър от инструментални грешки, свързани с различните типове сензори, докато втората е характерна за измервания в реални производствени условия, където динамичните грешки и влиянията на средата са особено отчетливи.

Подходи за компенсация на грешките

Компенсирането на грешките при координатни измервания се основава на съчетаване на математически модели, алгоритми за обработка на данни и интеграция на допълнителни сензорни системи. Подходите могат да се групират в няколко основни направления:

- **Математическо моделиране и алгоритми** – създават се модели на поведението на измервателната система, които описват влиянието на различни фактори върху резултатите. Към този клас принадлежат подходи като метода на най-малките квадрати, вероятностни модели за разпределение на грешките, както и алгоритми на филтъра на Калман за оценка на състоянието и потискане на шума.
- **Адаптивна обработка на данни** – прилага се, когато условията на измерване са динамични и трудно предвидими. Адаптивните алгоритми осигуряват корекция в реално време, като използват текущи статистически оценки на грешките и адаптират тегловните коефициенти в процеса на изчисление.
- **Използване на допълнителни сензорни системи** – за да се ограничи влиянието на динамичните грешки, често се интегрират MEMS сензори или лазерни референтни системи. Те предоставят допълнителна инфор-

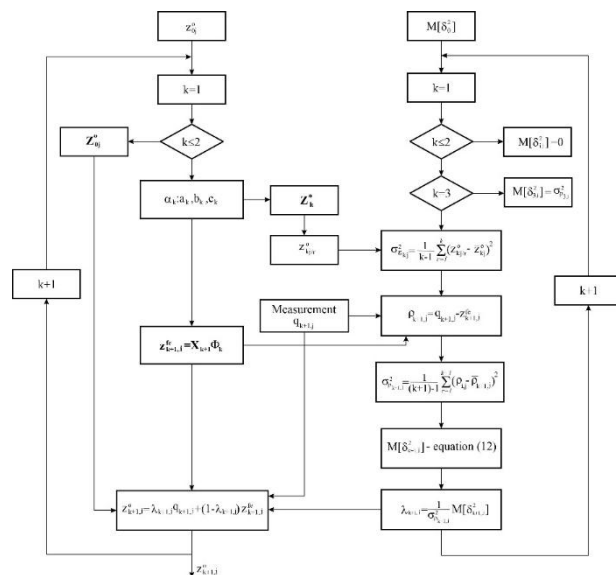
мация, която служи за изграждане на външни референтни елементи или за въвеждане на коригиращи величини в модела.

- **Филтрационни методи** – прилагането на филтри (филтри на Калман, Винер, Савицки–Голай и др.) позволява отделяне на полезния сигнал от случайните и систематични смущения. Филтрацията се използва както за изглаждане на измервателните данни, така и за корекция на динамични въздействия.

Особено перспективни са интегрираните подходи, при които се комбинира използването на класически координатни измервателни машини с математически модели за динамична корекция. Така се постига баланс между високата метрологична надеждност на оборудването и адаптивността на алгоритмите за работа в реални производствени условия.

На фиг. 3 е показана блок-схема на алгоритъм за компенсация на грешки, разработен върху принципа „predictor–corrector“. Алгоритъмът включва два основни цикъла – предсказване и корекция. В първия цикъл се изчислява предварителна оценка на измерваната величина на базата на теоретичния модел на измервания обект, което позволява да се отчете геометричната връзка между съседни координатни точки. Във втория цикъл тази предварителна оценка се комбинира с реално измерената стойност чрез тегловен коефициент, който се определя адаптивно за всяка итерация така, че да минимизира средноквадратичната грешка. По този начин алгоритъмът работи в итеративен режим, при който всяка нова оценка отчита както текущото измерване, така и натрупаната статистическа информация за грешките на модела и на измервателната система. Това осигурява баланс между предсказването и реалните данни и по-

зволява постигане на висока точност и устойчивост при наличие на динамични въздействия.



Фиг. 3. Блок-схема на алгоритъм за компенсация на грешки при координатни измервания, работещ в режим „predictor–corrector“

Приложение на мултисензорни измервателни системи и измервателни ръце

Практическата ефективност на методите за компенсация на грешки до голяма степен зависи от използваните измервателни системи. Мултисензорните координатни машини (фиг. 1) и преносимите измервателни ръце със скенер (фиг. 2) представляват два различни, но взаимно допълващи се подхода. Първите предлагат висока обемна точност и възможност за автоматизирани измервания в контролирана среда, което ги прави особено подходящи за лабораторни приложения и задачи, изискващи максимална метрологична надеждност. Вторите осигуряват гъвкавост и мобилност, като позволяват извършване на измервания директно в производствената среда и при изделия с големи габарити, които трудно могат да бъдат пренесени до стационарна система.



Комбинирането на тези системи с алгоритми за компенсация на динамични и инструментални грешки създава условия за постигане на висока точност в реални производствени условия. Това е особено важно при изделия със сложна геометрия и при работни среди, в които външни фактори като вибрации и температурни промени оказват силно влияние върху резултатите.

В този контекст мултисензорните координатни системи и преносимите измервателни ръце трябва да се разглеждат като решения с различна област на приложение, които взаимно се допълват. Чрез тяхното интегрирано използване се разширява обхватът на координатните измервания и се осигурява надежден инструментариум за контрол на качеството и за оптимизация на производствените процеси в индустриалната практика.

ИНТЕГРИРАН ПОДХОД ЗА ПОВИШАВАНЕ НА ТОЧНОСТТА ПРИ КООРДИНАТНИ ИЗМЕРВАНИЯ

Обединяване на експерименталната база и алгоритмичните методи

Ефективното компенсиране на грешки при координатни измервания изисква не само разработване на подходящи математически модели и алгоритми, но и тяхната верификация в реална измервателна среда. В този контекст мултисензорните системи и измервателните ръце със скенер, представени в раздел 2, осигуряват необходимата експериментална база за изпитване на алгоритми за динамична корекция. Алгоритмите, основани на принципа „predictor–corrector“ и на адаптивното претегляне на измерванията, демонстрират способност да ограничават влиянието на динамични смущения и инструментални ограничения върху резултатите. Прилагането им върху данни, получени от координатни измервателни

машини и мобилни системи, позволява едновременно да се оценява точността на модела и да се адаптира измервателният процес към конкретните условия. Лабораторната инфраструктура играе важна роля в този процес, тъй като предоставя възможност за контролирани експерименти, при които могат да се възпроизведат типични индустриални въздействия като вибрации и температурни промени. Така се осигурява надеждна основа за калибриране и оптимизация на алгоритмите, преди те да бъдат внедрени в реалната производствена среда. В основата на алгоритъма стои итеративна процедура, при която стойността на измерваната величина $y(k)$ се определя като комбинация от предсказаната стойност $\hat{y}(k)$ и реалното измерване $z(k)$:

$$y(k) = [1 - K(k)] \cdot \hat{y}(k) + K(k) \cdot z(k), (1)$$

където $K(k)$ е адаптивен коефициент, който се определя така, че да минимизира средноквадратичната грешка.

Чрез тази ефективна постановка се осигурява баланс между модела и реалните данни, което води до по-висока точност и устойчивост спрямо външни въздействия.

Приложимост в реални производствени условия

Прилагането на методи за компенсация на грешките е от особено значение в реалните производствени условия, където измервателните системи са изложени на редица смущаващи фактори. Сред най-често срещаните са вибрациите, породени от работата на тежки машини и транспортни системи, температурните изменения, водещи до термични деформации на детайлите и измервателните средства, както и електромагнитните смущения, засягащи електронните компоненти. В тези условия измерените стойности $z(k)$ често съдържат смущения, които се проявяват като грешка



между реалното измерване и оценката на алгоритъма $y(k)$:

$$e(k) = z(k) - y(k). \quad (2)$$

Тази грешка включва не само инструментални отклонения, но и влиянията на динамични въздействия и външни фактори, характерни за производствената среда. Целта на алгоритмите за компенсация е минимизиране на средноквадратичната стойност на тази грешка:

$$J = \min E \{e^2(k)\}. \quad (3)$$

По този начин приложимостта на разработените методи се изразява в тяхната способност да адаптират измервателния процес към реалните условия, като ограничават влиянието на случайни и систематични смущения. Комбинацията от мултисензорни системи и адаптивни алгоритми създава предпоставки за постигане на висока точност и надеждност дори в неблагоприятна индустриална среда.

Примери за резултати и перспективи

Ефективността на разгледания подход се оценява чрез намаляване на грешките и подобряване на устойчивостта на координатните измервания в реални производствени среди. Основен показател за това е ковариацията на грешката, която се актуализира на всяка итерация съгласно:

$$P(k) = [1 - K(k)] \cdot P(k|k-1), \quad (4)$$

където $P(k|k-1)$ е предсказаната ковариация на грешката въз основа на модела, а $P(k)$ – актуализираната ковариация след въвеждане на реалното измерване.

Тази зависимост показва как чрез избора на тегловния коефициент $K(k)$ алгоритъмът контролира степента на доверие към модела и измерванията, като по този начин

се намалява неопределеността на оценката. В резултат се осигурява по-висока надеждност на координатните измервания, дори при наличие на вибрации, температурни изменения и други външни фактори.

Перспективите за развитие включват до-развиване на адаптивните алгоритми, интеграция на невронни мрежи за оценка на параметрите на грешките и разширяване на приложението на метода към сложни индустриални сценарии с високи изисквания за точност и повтораемост.

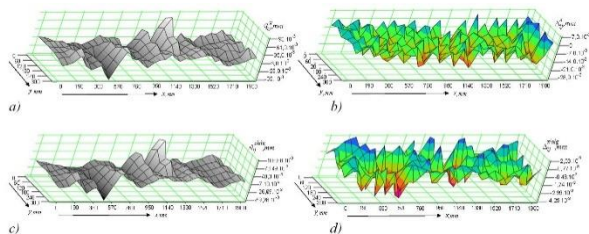
ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

За експерименталната проверка на предложената методология е използван равнинен еталонен детайл с дължина около 1900 mm, монтиран върху стенд-симулатор тип хексапод „Mistral“ (Symétrie). Системата позволява възпроизвеждане на контролирани вибрации и динамични въздействия по трите линейни координати (x , y , z) и по трите ъглови оси. Като измервателна апаратура са използвани линейни датчици ST1288 HEIDENHAIN с деление $i=0.001$ mm, свързани към многоканален модул GAGE-CHECK ND2108G. Монтажът е реализиран върху аеростатични опори за изолация от външни смущения.

Симулациите обхващат четири режима: вертикални въздействия, въздействия по ос x , въздействия по ос y и комбинирани смущения по (x , y , z). Спектралният анализ на записаните сигнали при вертикално въздействие показва характерни индустриални пикове на около 15 Hz, 21 Hz и 27 Hz, които са използвани за възпроизвеждане на реалистични динамични условия.

Като демонстративен пример на всичко, казано по-горе на фиг. 4 са показани резултатите при въздействия по ос x . Без алгоритъм за компенсация средната разлика спрямо референтната равнина е приблизително $\Delta z = 8 \mu m$, а стандартното отклоне-

ние достига $\sigma \approx 3.8 \mu\text{m}$. При прилагане на алгоритъма стойностите се редуцират съответно до $\Delta z = 1 \mu\text{m}$ и $\sigma \approx 0.6 \mu\text{m}$.



Фиг. 4. Сравнение на измерените отклонения от равнинността при въздействия по ос x : резултати без компенсация (горе) и с компенсация (долу); а) резултати от измервания, получени без използване на модула с алгоритъма; б) грешки в измерванията, възникващи, когато модула с алгоритъма не се използва; в) резултати от измервания, получени с помощта на модула с алгоритъма; г) грешки в измерванията, възникващи при използване на модула с алгоритъма.

Резултатите потвърждават, че интегрирането на предложените алгоритми значително намалява влиянието на индустриални вибрации върху точността на измерванията. Това осигурява по-стабилни и надеждни резултати, които се доближават до номиналната равнинност дори при динамични натоварвания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представената работа разглежда интегриран подход за повишаване на точността при координатни измервания чрез комбиниране на мултисензорни измервателни системи и алгоритми за компенсация на грешки. Разработената методология се основава на принципа *predictor-corrector* и минимизиране на средноквадратичната грешка, като осигурява адаптивен баланс между модела и реалните измервания.

Експерименталната проверка с равнинни еталонни детайли и стенд-симулатор за

възпроизвеждане на вибрации потвърждава, че прилагането на алгоритмите води до съществено намаляване на средната грешка и на вариациите на резултатите. По този начин се постига устойчивост на координатните измервания дори в условия, близки до индустриалната практика.

Получените резултати демонстрират, че интегрирането на методи за компенсация на грешки в съвременни измервателни системи създава предпоставки за надеждно и ефективно приложение в производствени среди с високи изисквания за точност и повторяемост.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Zhang, Z., Jiang, F., Ming, L. U. O., Baohai, W. U., Zhang, D., Tang, K. Geometric error measuring, modeling, and compensation for CNC machine tools: a review. *Chinese Journal of Aeronautics* 2024, 37(2), 163-198.
- [2] Zhang, Z., Cai, L., Cheng, Q., Liu, Z., Gu, P. A geometric error budget method to improve machining accuracy reliability of multi-axis machine tools. *Journal of Intelligent Manufacturing* 2019, 30, 495-519.
- [3] Franco, P., Jodar, J. Theoretical analysis of straightness errors in coordinate measuring machines (CMM) with three linear axes. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 2021, 22, 63-72.
- [4] Dichev, D., Diakov, D., Zhelezarov, I., Valkov, S., Ormanova, M., Dicheva, R., Kupriyanov, O.



- (2024). A method for correction of dynamic errors when measuring flat surfaces. *Sensors*, 24(16), 5154.
- [5] Miteva, R., Diakov, D., Nikolova, H., Dukendjiev, G., „Approximation of Furie Experimental Data of Straightness Standard“, 32nd International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance, MMA 2022, 2022. DOI: 10.1109/MMA55579.2022.9993325
- [6] Diakov, D., Kalimanova, I., Nikolova, H., Miteva, R., „Spatial stability investigating and angular orientation ensuring of the laser beams of a dual-channel LMS“, 32nd International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance, MMA 2022, 2022. DOI: 10.1109/MMA55579.2022.9992792
- [7] Diakov, D., Nikolova, H., Komarski, D., Dimitrova, D., „Systems for Measuring Deviations of Shape, Orientation and Position“, 34th International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance, MMA 2024, 2024. DOI: 10.1109/MMA62616.2024.10817664
- [8] Dichev, D.; Koev, H.; Bakalova, T.; Louda, P. A Model of the Dynamic Error as a Measurement Result of Instruments Defining the Parameters of Moving Objects. *Measurement Science Review* 2014, 4 (14), 183-189.
- [9] Tomczyk, K.; Piekarczyk, M.; Sokal, G. Radial Basis Functions Intended to Determine the Upper Bound of Absolute Dynamic Error at the Output of Voltage-Mode Accelerometers. *Sensors* 2019, 19 (19), 4154.
- [10] Zheng, W.; Liu, Z.; Fu, L.; Guo, J. Effective improvement of scanning resonance through dynamic optimization of the probe. *Measurement* 2021, 178, 109438.
- [11] Jinwen, W.; Yanling, C. The geometric dynamic errors of CMMs in fast scanning-probing. *Measurement* 2011, 44 (3), 511-517.
- [12] Choi, J. P.; Min, B. K.; Lee, S. J. Reduction of machining errors of a three-axis machine tool by on-machine measurement and error compensation system. *Journal of Materials Processing Technology* 2004, 155, 2056-2064.
- [13] Tomczyk, K. Procedure Proposal for Establishing the Class of Dynamic Accuracy for Measurement Sensors Using Simulation Signals with One Constraint. *Measurement* 2021, 178, 109367.
- [14] Vassilev, V., Dimitrova, R., Nikolov, S. Optimization of the Operation of a Flexible Automated Assembly Line Using the Seven Basic Quality Tools. *Engineering Proceedings*, volume 104, issue 1, 2025, 42. DOI: 10.3390/engproc2025104042
- [15] Mitev, P. (2025). Development of a System for Flexible Feeding of Parts with Robot and Machine Vision. *Engineering Proceedings*, 104(1), 84.
- [16] Dong, C.; Zhang, C.; Wang, B.; Zhang, G. Prediction and compensation of dynamic errors for coordinate measuring machines. *J. Manuf. Sci. Eng.* 2002, 124(3), 509-514.
- [17] Dong, C.; Zhang, C.; Wang, B.; Zhang, G. Dynamic Error Prediction and Compensation of Coordinate Measuring Machines. In *Proceedings of the ASME 2000 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Manufacturing Engineering*. Orlando, Florida, USA. November 2020, 55-61.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

РОБОТИКА И МЕХАТРОНИКА: ОСНОВИ НА СОЦИАЛНИ, КОЛАБОРАТИВНИ И ИНТЕРАКТИВНИ СИСТЕМИ ЧОВЕК–РОБОТ — ЛАБОРАТОРЕН ОБОБЩЕН ДОКЛАД

ROBOTICS AND MECHATRONICS: FOUNDATIONS FOR SOCIAL, COLLABORATIVE, AND INTERACTIVE HUMAN–ROBOT SYSTEMS — A LABORATORY SUMMARY REPORT

Tanio K. Tanev

Institute of Robotics, Bulgarian Academy of Science

Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract

The paper presents the research activities and equipment of the Robotics and Mechatronics Laboratory at the Institute of Robotics, Bulgarian Academy of Sciences. The laboratory is a part of the Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies". Description of the main research equipment and selected research results obtained by the members of the laboratory during the period 2019 - 2025 are summarized and presented in the paper.

Keywords: robots, humanoid robot, collaborative robot, human–robot interaction, AI integration.

INTRODUCTION

Robotics and mechatronics are two rapidly developing fields engaging mechanical engineering, electronics, computer science, and control systems. This helps advancing innovation throughout industries from manufacturing to healthcare. The integration of intelligent control with mechanical systems has given rise to mechatronics—a multidisciplinary approach that reinforces modern robotic design, flexibility, and performance. As automation becomes increasingly central to technological advancement, robotics and mechatronics offer foundational frameworks for developing adaptive, efficient, and autonomous systems. Recent developments in sensor technology, embedded systems, and artificial intelligence

have significantly expanded the capabilities of robotic and mechatronic systems, enabling more complex and responsive behaviours. The robotic systems have been developed not only for industrial applications, but also for other applications. In this respect, social robots emerge as autonomous agents capable of adopting interaction, emotion, and companionship in domains such as rehabilitation, education, and customer service [1], [2]. Social robots are designed to engage with humans through verbal and non-verbal communication and represent a progressive frame in robotics, that combines mechanical systems with cognitive and emotional intelligence. The development of social robots relies on the integration of sensors, actuators, artificial intelligence, and human-

centred design principles. Unlike industrial robots, social robots are engineered to interpret and respond to human behaviour. They are capable of two-way interaction, i.e., a robot is expected to be able to respond to a human in a social manner, which makes them essential in advancing human-robot interaction and reconsidering the role of machines in everyday life [1].

Another rapidly evolving branch of robotics is collaborative robots. Collaborative robots, or cobots, are designed to operate safely alongside humans in shared workspaces without the need for physical barriers [3]. Unlike traditional industrial robots, cobots are designed with advanced sensors, adaptive control systems, and ergonomic design principles that enable intuitive human-robot interaction and real-time environmental responsiveness [4]. They play an essential role in human-centric automation, where robotic systems are optimized not only for precision and efficiency but also for collaboration, adaptability, and ease of integration [4].

Human-robot interaction (HRI) has become a fast-progressing field, integrating robotics, artificial intelligence, neuroscience, and immersive technologies. Interactive robotics focuses on the development of robotic systems capable of engaging in dynamic, real-time communication, and cooperation with humans, often through multimodal interfaces such as speech, gesture, and touch. At the intersection of robotics and human-computer interaction, interactive robots are designed not only to perform tasks but to learn, adapt, and respond to human behaviour in unstructured environments.

RESEARCH EQUIPMENT OF THE LABORATORY

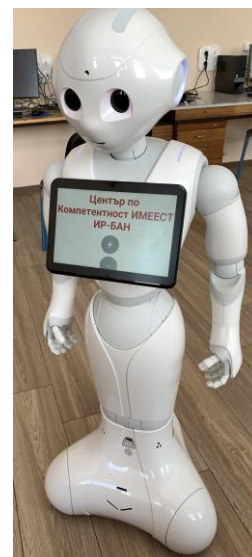
1. Social humanoid robots

The laboratory is equipped with two types of humanoid robots – Nao and Pepper (Fig.1).

Both robots are widely adopted in academic and commercial settings, but they serve distinct roles: Nao [5] is mostly used in controlled environments like classrooms and laboratories, while Pepper [6] is applied in public-facing roles where emotional engagement and social presence are important.



a) Nao



b) Pepper

Fig. 1. Humanoid robots Nao and Pepper

NAO is smaller, more agile, and widely used in education and therapy and it is applied in education, research, human-robot interaction studies, therapy for children with special needs.

Pepper is taller, designed for social interaction and engagement with humans, often in public or commercial spaces. It is used in customer service, education, healthcare, research in social robotics.

2. Collaborative robot

Franka Emika Panda [7] (Fig.2) is a state-of-the-art 7-axis robotic arm designed for safe, flexible, and high-precision human-robot collaboration. It combines advanced mechatronic design with intuitive software, making it ideal for research, education, and industrial automation.

The essential features of the robot are:

- Torque sensors in all joints for sensitive force control and safe interaction with humans;
- High dexterity due to its 7-axis kinematic structure, enabling complex manipulation tasks;
- Intuitive programming via the Desk interface and support for ROS (Robot Operating System), Python, and C++;



Fig. 2. The Franka Emika Panda robot

The applications of this robot are as follows: precision assembly; human-robot collaboration; research in robotics and AI; Educational platforms.

3. Mixed reality head-mounted display

The HoloLens 2 (Fig.3) is a mixed reality head-mounted display developed by Microsoft. It offers immersive holographic experiences by blending digital content with the physical world, enabling users to interact with 3D holograms in real-time [8].

The essential features of the device are:

- Immersive Mixed Reality: Combines spatial mapping and holographic projection to overlay digital content onto the real world;
- Natural interaction: Users can manipulate holograms using hand gestures, voice commands, and eye movement;
- Enterprise integration: Compatible with Microsoft Dynamics 365 apps like Remote Assist and Guides for industrial workflows;
- Comfort & Ergonomics: Designed for extended use with improved weight distribution and adjustable fit;



Fig. 3. The HoloLens 2

The HoloLens mixed reality head-mounted display could be used in areas such as industrial training and remote assistance; medical visualization and surgical planning;

4. EEG-based brain-computer interface (BCI) platforms

The laboratory is equipped with the following brain-computer interface (BCI) devices: Emotiv EPOC+ [9], Emotiv Insight [10] and OPEN BCI [11]. These devices are shown in Fig.4.

Emotiv EPOC+ is a robust, research-grade EEG headset with 14 channels, suitable for cognitive studies and neurofeedback. It offers good signal quality but requires saline preparation and a subscription for full data access [9]. Emotiv Insight is a more portable, user-friendly version with fewer channels and dry sensors, ideal for wellness tracking and basic BCI applications [10]. OpenBCI stands out for its open-source architecture, customizable hardware, and full access to raw EEG data [11].



Fig. 4. EEG-based brain-computer interface (BCI) platforms

These devices are used for:

- Studying brain activity during tasks like attention, memory, and decision-making;
- Human-computer interaction (HCI): Exploring how users interact with digital systems using brain signals, sending mental commands to external devices (e.g., drones, games, prosthetics), detecting subtle muscle movements for non-verbal communication.

5. Depth cameras

Depth camera—also known as a 3D camera or depth sensor—is an imaging device that captures not only colour and brightness (like traditional cameras) but also the distance between the camera and objects in the scene. This added layer of spatial information enables machines to perceive the world in three dimensions. The depth cameras usage is in the following cases:

- Robotics: For obstacle detection, navigation, and manipulation.

- Augmented & Virtual Reality (AR/VR): To track user movement and map environments.
- Healthcare: In motion analysis and rehabilitation systems.
- Industrial Automation: Object sorting, inspection, and quality control.

6. 3D printers and 3D scanner

The 3D printers are very useful for rapid prototyping, i.e., engineers can quickly test and iterate designs. The following 3D printers are available in our laboratory: Objet 30 PrimeTM [12], Flashforge Creator 3 [13], Liquid Crystal HR 2 [14], Prusa MK4 [15].

The Objet30 Prime™ is a compact, high-resolution PolyJet 3D printer designed for professional prototyping across industries such as consumer electronics, medical devices, and engineering design.

The Flashforge Creator 3 is a high-performance Fused Filament Fabrication (FFF) 3D printer. It features an Independent Dual Extruder (IDEX) system, allowing simultaneous printing of two different materials. Both Flashforge Creator 3 and Prusa MK4 use FFF technology for printing.

The Liquid Crystal HR 2 is a resin-based 3D printer that utilizes Daylight Polymer Printing (DPP) - a unique technology developed by Photocentric. Unlike traditional SLA or DLP printers that rely on UV light, the HR 2 uses visible light from an LCD screen to cure specially formulated daylight resins.

SELECTED RESEARCH RESULTS OF THE LABORATORY ACHIEVED DURING THE TIME PERIOD 2019 - 2024

The research results can be summarized in the following research areas:

- 1) **Motion tracking, analysis, and transfer:** Emotional and social movement patterns were extracted from actors and



transferred to humanoid robots to enhance expressiveness [16]. An innovative method for transferring the emotional and social talents of theatre actors into socially assistive robots to improve child-robot interaction was introduced, particularly for children with communication and developmental disorders. Using an EMOTIV EPOC+ EEG device with inertial sensors, actors' head motions and facial expressions were captured, processed the data through geometric algebra algorithms, and transferred them to the robot for realistic expression. The system was tested within therapeutic contexts, showing that children responded positively, with increased attention, motivation, and engagement. Parents also reported favourable impressions. The study marks an initial step toward merging educational theatre techniques with robotics to foster emotional learning, attention, and teamwork in children with special educational needs [16].

2) **Kinematic modelling and locomotion design:** New formulations and algorithms for solving inverse kinematics in serial robot topologies were developed [17]. A new algorithm for systematically classifying and computing inverse kinematics (IK) solutions for planar serial robots was presented. The algorithm was implemented in AutoCAD and tested on robots with two and three degrees of freedom, successfully visualizing feasible trajectories. The results support applications in robot motion planning, workspace analysis, and kinematic design [18]. Minimalist principles were applied to generate walking strategies for robots in unstructured terrain [18]. Control algorithms for optimizing the walking cycle of a minimalist robot named Big Foot, which operates with only two motors were presented. Despite its simple design, the robot can walk, avoid obstacles, and climb stairs. It uses various sensors—including tactile sensors and motor

encoders—to enhance motion control. Experimental validation using a 3D-printed prototype confirmed that the polynomial law offers superior performance in terms of speed and smoothness, making it a promising approach for similar low-cost walking robots [18].

3) **Speech therapy system (SST):** SST supports therapists and integrates into IoT infrastructures and validated in real-world settings. The study [19] presented the design, development, and experimental validation of a Speech and Language Therapy (SLT) system with the potential to operate in the Internet of Things (IoT) environment. The system integrates multiple assistive technologies—including the humanoid NAO robot, the EmoSan expressive robot, the Emotiv EPOC+ brain-computer interface, and a Kinect depth sensor—connected through Node-RED, a flow-based programming platform. Over six months, the system was tested with 15 children (ages 3–10) with communication disorders. The therapy sessions used interactive, play-based scenarios where the robots engaged children in structured games, supported by emotional cues and brain-state monitoring. Results showed that the system enhanced motivation, attention, and verbal communication, and children responded positively to robot-assisted interventions [19].

4) **Conversational AI integration:** GPT-based IoT frameworks were applied to humanoid robots for natural language interaction [20]. A model using Generative Pre-trained Transformer (GPT) technology in the Internet of Things has been created to enhance the potential of humanoid robots as learning and social assistants for natural language interaction. The physical presence of the robot enriches human communication and helps to send of automatic context to the GPT model [20].



5) **Neuro-cognitive modelling:** EEG and eye-tracking data informed conceptual models for pedagogical human–robot interaction [21]. A conceptual model of neuro-cognitive processing of semantic and perceptual information in the learning process of human-robot interaction was proposed, based on modern research on EEG signal processing and eye tracking, applicable in education supported by socially competent robots [21].

CONCLUSION

This summary report presents the equipment and the main research activities of the “Robotics and Mechatronics” laboratory which is funded by the Project Center of Competence “Smart Mechatronics, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies”. The equipment is utilized to obtain research results in the field of robot interaction; motion transfer; kinematic design; 3D-printed optimized robots; assistive therapies, and cognitive modelling. The obtained research results show how robotics, AI, IoT, and neuroscience converge to produce transformative technologies in assistive robotics.

Acknowledgement

This research was funded by the European Regional Development Fund under the Operational Program “Scientific Research, Innovation and Digitization for Smart Transformation 2021-2027”, Project CoC “Smart Mechatronics, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies”, BG16RFPR002-1.014-0005.

REFERENCES

- [1] Henschel, A., Laban, G. & Cross, E.S. What Makes a Robot Social? A Review of Social Robots from Science Fiction to a Home or Hospital Near You. *Curr Robot Rep* 2, 9–19, 2021. <https://doi.org/10.1007/s43154-020-00035-0>.
- [2] <https://roboticsmeta.com/types-of-social-robots/>, last visited 15 Sept. 2025.
- [3] Patil, S., Vasu, V. & Srinadh, K.V.S. Advances and perspectives in collaborative robotics: a review of key technologies and emerging trends. *Discov Mechanical Engineering* 2, 13, 2023. <https://doi.org/10.1007/s44245-023-00021-8>.
- [4] <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/how-robots-work-alongside-humans>, last visited 15 Sept. 2025.
- [5] <https://aldebaran.com/en/nao6/>, last visited 15 Sept. 2025.
- [6] <https://aldebaran.com/en/pepper/>, last visited 15 Sept. 2025.
- [7] <https://franka.de/>, last visited 15 Sept. 2025.
- [8] <https://learn.microsoft.com/en-us/hololens/>, last visited 15 Sept. 2025.
- [9] <https://www.emotiv.com/products/epoc-x>, last visited 15 Sept. 2025.
- [10] <https://www.emotiv.com/products/insight>, last visited 15 Sept. 2025.
- [11] <https://openbci.com/>, last visited 15 Sept. 2025.
- [12] <https://support.stratasys.com/en/Printers/PolyJet-Legacy/Objet30-V5-Pro-and-Prime>, last visited 15 Sept. 2025.
- [13] <https://www.flashforge.com/>, last visited 15 Sept. 2025.
- [14] <https://photocentricgroup.com/>,
- [15] <https://www.prusa3d.com/category/3d-printers/>, last visited 15 Sept. 2025.
- [16] Tanev, T.K., Lekova, A. Implementation of Actors’ Emotional Talent into Social Robots Through Capture of Human Head’s Motion and Basic Expression. *Int J of Soc Robotics* 14, 1749–1766, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12369-022-00910-0>
- [17] Chavdarov I, Naydenov B. Algorithm for Determining the Types of Inverse Kinematics Solutions for Sequential Planar Robots and Their Representation in the Configuration Space. *Algorithms*; 15(12):469, 2022. <https://doi.org/10.3390/a15120469>
- [18] Chavdarov I, Yovchev K, Miteva L, Stefanov A, Nedanovski D. A Strategy for Controlling Motions Related to Sensory Information in a Walking Robot Big Foot. *Sensors*. 2023; 23(3):1506. <https://doi.org/10.3390/s23031506>



- [19] Lekova A., Andreeva A., Tanev T., Simonska M., and Kostova S. A system for speech and language therapy with a potential to work in the IoT. In Proc. of the 23rd Int. Conf. on Computer Systems and Technologies (CompSysTech '22). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2022. 119–124. <https://doi.org/10.1145/3546118.3546147>
- [20] Lekova A., Tsvetkova P., Tanev T., Mitrouchev P., and Kostova S., Making humanoid robots teaching assistants by using natural language processing (NLP) cloud-based services, Journal of Mechatronics and Artificial Intelligence in Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 30–39, Jun. 2022, <https://doi.org/10.21595/jmai.2022.22720>
- [21] Dimitrova M, Wagatsuma H, Krastev A, Vrochidou E and Nunez-Gonzalez JD. A Review of Possible EEG Markers of Abstraction, Attentiveness, and Memorisation in Cyber-Physical Systems for Special Education. Front. Robot. AI 8:715962, 2021. doi: 10.3389/frobt.2021.715962.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ЛАБОРАТОРИЯ „АВТОМОБИЛНИ МЕХАТРОННИ СИСТЕМИ“ 2018-2023

AUTOMOTIVE MECHATRONIC SYSTEMS LABORATORY 2018-2023

Krasimir Ambarev^{1,2}

Stiliyana Taneva^{1,2}

Valyo Nikolov^{1,2}

*Technical University of Sofia, Plovdiv Branch, 25 Tsanko Dyustabanov Str., Plovdiv, Bulgaria ¹
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies" ²*

Abstract This article presents the means and results obtained from the research conducted in the "Automotive Mechatronic Systems" laboratory during the period 2018 - 2023 on new and modernized mechatronic systems for controlling the engine and transmission combinations of cars, using a drive wheel loading system and a system for measuring toxic components in the exhaust gases of internal combustion engines. Through subsequent computer processing, the power, environmental and economic indicators were determined. A simulation model was developed to determine the drag of low- and ultra-low-profile tires when driving a car in a bend to ensure better stability and controllability. Three-dimensional geometric models of various details of the car's transmission were developed and various analyses were conducted using modern software products.

Keywords: automotive mechatronic systems, vehicles, cars, internal combustion engines, simulation model, software products.

ВЪВЕДЕНИЕ

Прегледът на научните списания, в които основно се публикуват резултати от изследвания в областта на двигателите с вътрешно горене (ДВГ) показва, че през последните години изследователски колективи от различни страни активно работят в насоки, водещи до усъвършенстване на мощностните, икономични и екологични показатели на ДВГ. Усилията са насочени главно към оптимизиране на процесите от работния цикъл на ДВГ, което е свързано с подобряване на икономичните, мощности и екологични показатели. Изследванията в тази област през последните няколко години бележат значителна активност, в ре-

зултат на което се увеличава броят на научните публикации.

Значителна част от изследванията са свързани с организацията на протичане на горивния процес, както при двигателите със самовъзпламеняване на гориво-въздушната смес, така и при тези с принудително запалване. Развитието на електрониката и автоматиката спомага за по-доброто управление на горивния процес от работния цикъл на ДВГ. Изследванията по отношение на различни фази на газоразпределението при различните режими на работа на ДВГ и свързаните с това системи за газоразпределение, реализирането на различни закони за активното топлоотде-



ляне в цилиндъра и влиянието им върху процесите от работния цикъл на ДВГ и други се правят в редица страни.

Съществуват различни методи за изследване на работния цикъл на ДВГ и влиянието му върху мощностните, икономични и екологични показатели на ДВГ, които са свързани, както с извършването на компютърни симулации, така и с лабораторни изпитвания.

Изследвания в областта на намаляване на замърсяването от автомобилния транспорт са актуални, както за нашата страна, така и за другите страни от Европа и света. Поради намаляването на нефтените запаси в световен мащаб е необходимо подобряване на икономичните и мощностни показатели на ДВГ и използването на алтернативни горива.

Прегледът на научните списания, в които основно се публикуват резултати от изследвания в областта на управляемостта и устойчивостта при движение на транспортните средства показва, че през последните години изследователски колективи от различни страни активно работят в тази област. Усилията са насочени към разработване на различни математични модели и изследвания чрез използване на комплекс от експериментални лабораторни и пътни уредби и средства.

Значителна част от изследванията са свързани с определянето на характеристиките на пневматичните гуми на колелата и тяхното влияние върху траекторията на движение на автомобила, управляемостта, устойчивостта и стабилизацията на управляемите колела. Развитието на автомобилостроенето изисква все по-прецизно и качествено изследване и оптимизиране на важните параметри, оказващи влияние върху управляемостта, устойчивостта, стабилизацията на управляемите колела и безопасността при движение на транспортните средства.

Основните параметри, влияещи върху устойчивостта и управляемостта на транспортните средства са: вида и състоянието на пътната повърхност; скоростта на движение; разположението на масовия център; еластично-демпфиращите и геометрични характеристики на елементите от окачването; ъгълът, на който се отклоняват управляемите колела; типът на задвижването; типът и размерът на гумата, които предопределят нейните геометрични и еластични характеристики; страничното увличане на пневматичната гума; вътрешно налягане на въздуха в пневматичната гума; вертикалното натоварване на пневматичната гума; радиуса на завоя и др.

С развитието на електронните и мехатронните системи в автомобилостроенето се появяват нови решения за изследване на управляемостта и устойчивостта и безопасността при движение на транспортните средства. В основата на тези методи и средства е принципът, свързан с оптималното разпределение на силите в гумите между 4-те завиващи колела на автомобила.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Целта на настоящия доклад е да се представят средствата, закупени и доставени по проекта в лаборатория „Автомобилни мехатронни системи“ през периода 2018 – 2023 година и получените основни резултати от проведени изследвания на нови и модернизирани мехатронни системи за управление на процесите при работа на ДВГ и на съвместната работа на двигателя с трансмисията и определяне на влиянието им върху мощностните, икономичните и екологични показатели на транспортни средства чрез проведени лабораторни изпитвания, чрез прилагане на разработения симулационен модел за определяне на увличането на колелата с ниско и



свръхнископрофилни гуми при движение на автомобила в завой за осигуряване на по-добра устойчивост и управляемост.

В голяма част от изследванията и представените резултати в публикациите се използва система за натоварване на задвижващите колела (фиг.1), комбиниран аналогово-цифров (АЦП) и цифрово-аналогов преобразувател (ЦАП) с USB интерфейс (фиг.2), спирачен стенд и тестер за окачване (фиг.3) и система за индициране на ДВГ, включваща сензор за измерване на налягането на работното вещество в цилиндъра на ДВГ и комбиниран усилвател с преобразувател на сигнала от сензора (фиг.4), закупени по проекта. Използва се и допълнително оборудване - газанализатор за измерване на токсичните компоненти в отработилите газове на ДВГ (фиг. 5).



Фиг.1. Динамометричен стенд COSBER 4000



Фиг. 2. АЦП/ЦАП – „NI USB-6343“



Фиг. 3. Спирачен тестер “BEISSBARTH BD640” и тестер за окачването “BEISSBARTH SA640”



Фиг. 4. Сензор за измерване на налягането на работното вещество в цилиндъра на ДВГ – „AVL ZL45“ и комбиниран усилвател с преобразувател на сигнала от сензора – „AVL FI PIEZO, Type 2P2E“



Фиг.5. Газ анализатор DEK DG-04IR

В публикация [1] е изследвано влиянието на пътните съпротивления върху разхода на гориво на лек автомобил с автоматична трансмисия. Експерименталните измервания са направени на динамометричен стенд COSBER с използването на данни за моментния разход на гориво, получени от електронния блок за управление на ДВГ чрез използване на Bluetooth LE (4.0) adapters и приложението „Car Scanner Pro“. На фиг. 6 е представено използваното оборудване и автомобила за провеждане на експеримента, а на фиг. 7 е представена експериментално получена мощностна характеристика на лекия автомобил и външната честотна характеристика на двигателя.



Фиг. 6. Експериментално изследване на лек автомобил Honda Accord 2.4

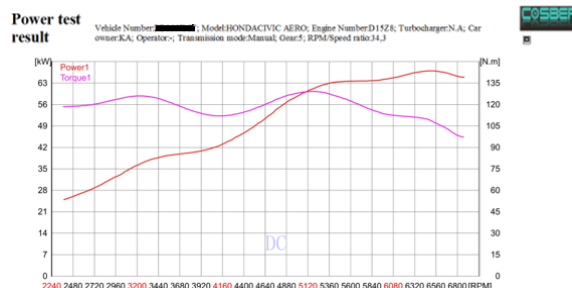


Фиг. 7. Мощностна характеристика на лекия автомобил и външната честотна характеристика на двигателя

В [2 и 3] са изследвани съответно влиянието на пътните съпротивления върху икономичните показатели и влиянието на надлъжния наклон на пътя върху максималната скорост на движение на лек автомобил Honda Civic с механична трансмисия, при получената експериментално с динамометричен стенд мощностна характеристика на автомобила (фиг. 8 и фиг. 9). Чрез използването на динамометричния стенд са определени максималните скорости на движение на лекия автомобил при различен наклон на пътя 4%, 9% и 15%, представени в табл.1. Използван е режима на работа „Road simulation“ (фиг. 10), при което е симулирано натоварване върху двигателните колела на автомобила. Чрез допълнително инсталирания на автомобила бордови компютър „Infoboard“ (фиг. 11) са определени и икономичните показатели при различни скорости на движение и наклон на пътя (фиг. 12).



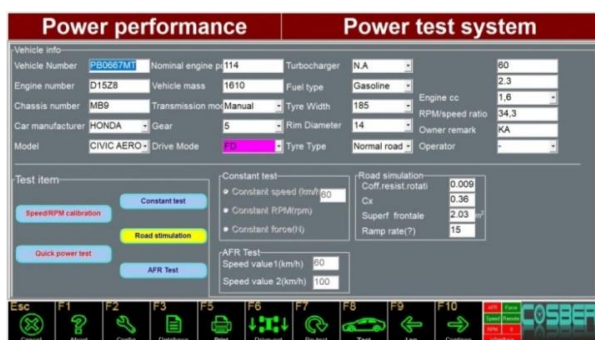
Фиг. 8. Експериментално изследване на лек автомобил Honda Civic Aerodeck 1,5 iLS



Фиг. 9. Мощностна характеристика на лекия автомобил

Таблица 1

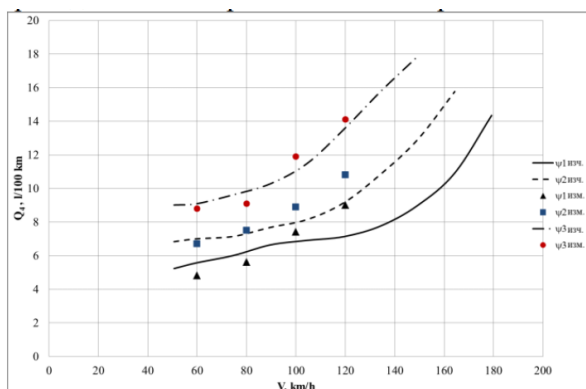
Предавки	$V_{\max}$, km/h		
	$\psi_1=0,049$	$\psi_2=0,099$	$\psi_3=0,159$
Втора	-	-	59
Трета	-	75	48
Четвърта	118	69	-
Пета	73	-	-



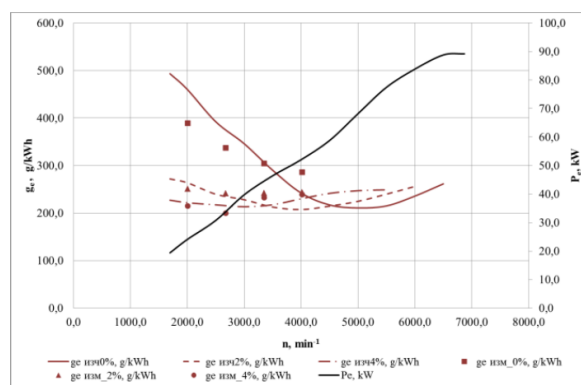
Фиг. 10. Екран при режим „Road simulation“



Фиг. 11. Основен работен екран на „Infoboard“, версия „touch screen“



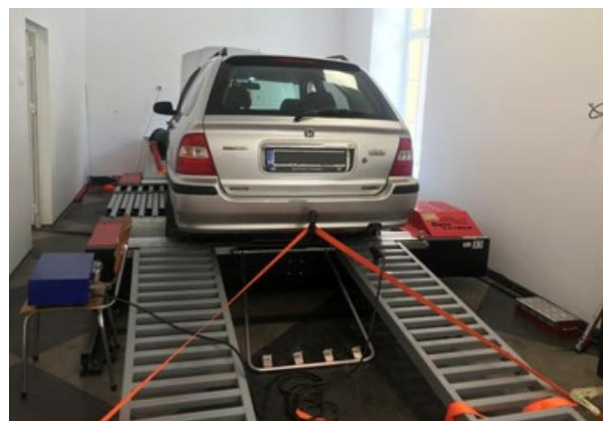
а) разход на гориво



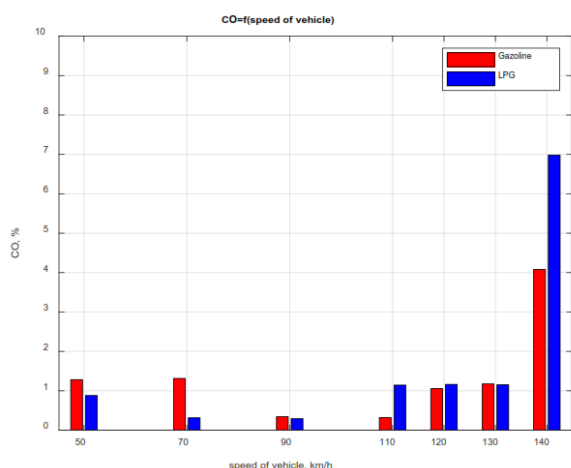
б) специфичния ефективен разход на гориво

Фиг. 12. Резултати за икономичните показатели

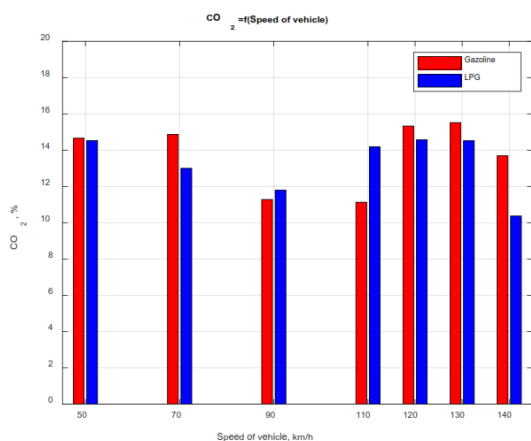
В [4] са изследвани токсичните компоненти в отработените газове при работа с два вида горива – бензин и втечен нефтен газ (ВНГ). Изследванията са проведени чрез използване на динамометричния стенд (фиг.1) и газанализатор (фиг.5). На фиг. 13 са представени автомобилa и необходимото оборудване за провеждане на експеримента, а на фиг. 14 - получените резултати за различните компоненти при различни скорости на движение на автомобилa и използване на режима на работа „Road simulation“.



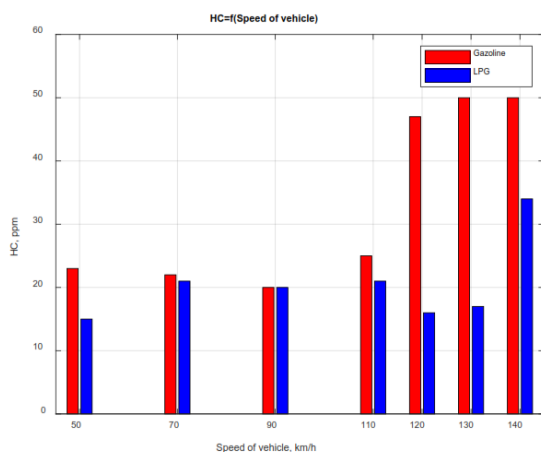
Фиг. 13. Експериментално изследване за измерване на компонентите в отработените газове на лек автомобил Honda Civic Aerodeck 1,5 iLS



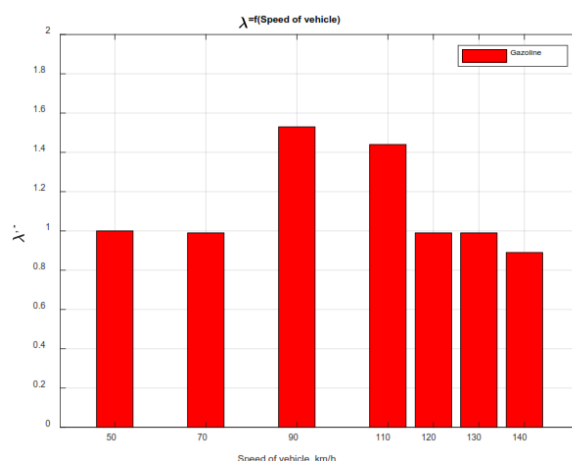
- CO



- CO₂



- HC

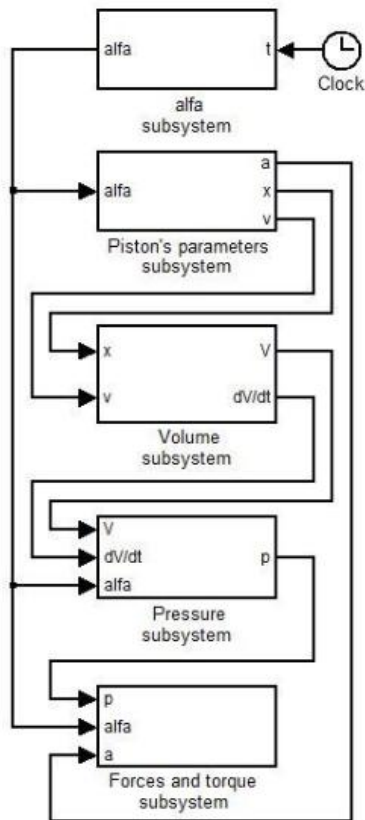


- λ

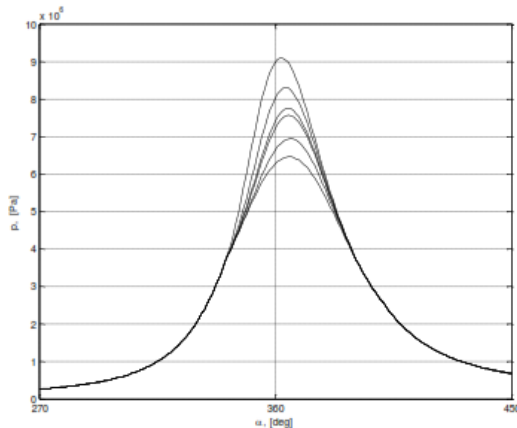
Фиг. 14. Експериментално изследване на компонентите в отработените газове

В [5] са разгледани особеностите, свързани с конвертирането на бензинов ДВГ на фирмата „Peugeot“ с код RFV за работа с ВНГ и е установено, че правилният подбор на елементите, инсталацията и най-вече настройката на автомобилната газова уредба при конвертиране на ДВГ за работа с ВНГ е от особено значение за мощностните, икономични и екологични показатели на ДВГ при работа с ВНГ.

В [6] е създаден и описан компютърен симулационен модел на работния цикъл на четиритактови ДВГ (фиг. 15) и на фиг. 16 са представени някои от получените резултати. С разработения симулационен модел могат да се изследват процесите при установени режими на работа и да се определи влиянието на конкретни параметри върху основни параметри, показатели и характеристики при работа с нови и модернизирани автомобилни мехатронни системи.



Фиг. 15. Симулационен модел на работния цикъл на ДВГ



Фиг. 16. Налягане при равни начални ъгли на топлоотделяне

В [7] са представени някои възможности за увеличаване на мощността на дизелов двигател, като са представени резулта-

ти за мощността, измерена на колелата на лек автомобил AUDI A4, в резултат на промяна на софтуера на системата за управление на дизеловия двигател.

Промяната в настройките на софтуера включва модифициране на цикловата порция гориво, ъгъла на изпреварване на впръскването и налягането на пълнене за различните режими на работа на двигателя. Измерванията са извършени в лабораторни условия с динамометричния стенд, представен на фиг.1 и режима на работа „Quick power test“. На фиг. 17 са представени графично резултати от измерванията на мощността на задвижващите колела при работа на системата за управление на ДВГ с различни софтуери.



а) с оригиналния софтуер (без модификации)



б) с модифициран софтуер (вариант 1)



в) с модифициран софтуер (вариант 2)

Фиг. 17. Измерена мощност на задвижващите колела

От резултатите на фиг.17 се вижда, че ефективната мощност при съвременните дизелови ДВГ с принудително пълнене може да се повиши само чрез промяна на софтуера на системата за управление на ДВГ, без да се влошават екологичните му показатели.

Съвместната работа на двигателя с трансмисията при транспортни средства с автоматични трансмисии до голяма степен зависи от правилния подбор на параметрите на хидротрансформатора, и при модернизирани на мехатронните системи за управлението им, което пък оказва влияние върху мощностните, икономичните и екологични показатели на транспортни средства. В [8] е представена методика за теоретично определяне на необходимите параметри на хидродинамичен трансформатор на лек автомобил и резултати от изследване на съвместната работа на ДВГ с хидротрасформатора.

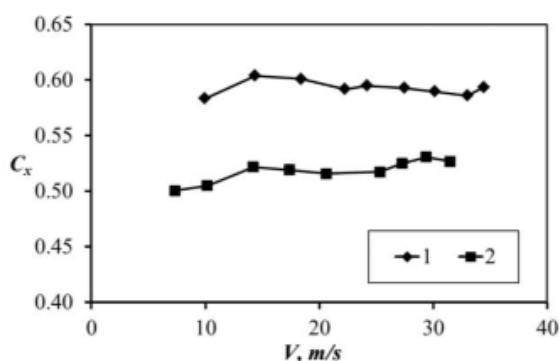
Един от параметрите, влияещи върху устойчивостта и управляемостта на транспортните средства е страничното увличане на пневматичната гума. В [9] е разработена интерактивна програмна система в средата MATLAB за изследване влиянието на скоростта на движение на лек автомобил с ниско и свръхнископрофилни гуми 14" и 16" в завой, като се отчита преразпределението на нормалното натоварване и влиянието му върху характеристиките на напречното увличане на пневматичните колела за осигуряване на по-добра устойчивост и управляемост. Върху устойчивостта и управляемостта на автомобилите оказват влияние правилното подбиране на схемата и компонентите на окачване. В настоящия момент особено актуален е въпросът за осигуряването на високото качество и съкращаване на времето в проектите и конструкторските работи, което се постига все по-лесно с развитието на компютрната техника и наличието на

различни специализирани програмни продукти, като се намаляват разходите, което по косвен път влияе върху екологичните показатели на транспортните средства. В работи [10-12] е разработен триизмерен геометричен модел на напречния лост от предно независимо окачване, тип Макферсън. Извършени са различни компютърни симулации с използване на метода на крайните елементи (МКЕ), като са получени резултати за еквивалентното напрежение, пълното преместване, собствените честоти и форми и е оптимизирана формата и масата на лоста.

Описаната в [13] опитна уредба (фиг.18) и методиката за определяне на коефициента на въздушно съпротивление, позволяват изследване на различни модели на автомобили, разработени в подходящ мащаб. В резултат на проведено изследване могат да се получат зависимости на изменението на въздушното съпротивление (фиг.19), коефициентът на обтекаемост и фактора на обтекаемост от скоростта на въздушното течение и числото на Рейнолдс.



Фиг.18. Експериментална уредба



Фиг. 19. Изменение на коефициента на въздушно съпротивление от скоростта на въздушното течение: 1 – със спуснати странични стъкла; 2 – с вдигнати странични стъкла

В публикации [14-16] са разработени триизмерни геометрични модели на различни детайли от трансмисията автомобилите и са проведени различни анализи чрез МКЕ, с използване на програмния продукт SolidWorks. Проведените анализи чрез МКЕ могат да са основа за провеждане на лабораторни и пътни изследвания на съответните детайли, като в изследванията да се включат и мехатронните им системи за управление и контрол.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата статия са представени средствата и получените резултати от направените изследвания в лаборатория „Автомобилни мехатронни системи“ през периода 2018 - 2023 година на нови и модернизирани мехатронни системи за управление на съвместната работа на двигателя с трансмисията на автомобили, чрез използване на система за натоварване на задвижващите колела и система за измерване на токсичните компоненти в отработилите газове на ДВГ. Чрез последваща компютърна обработка са определяни мощностните, екологичните и икономичните показатели. Разработен е симулационен модел за определяне на увеличаването на колета с ниско и свръхнископрофилни гуми при

движение на автомобил в завои за осигуряване на по-добра устойчивост и управляемост. Разработени са триизмерни геометрични модели на различни детайли от трансмисията на автомобиля и са проведени различни анализи с използване на съвременни програмни продукти.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Krasimir Ambarev, Stiliyana Taneva. Study of the Influence of Road Resistance on the Fuel Consumption of a Passenger Car with an Automatic Transmission, "Environment. Technology. Resources", Rezekne, Latvia, Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Conference. 2023. Volume 3, pp 15-19, Print ISSN 1691-5402, Online ISSN 2256-070X, <https://doi.org/10.17770/etr2023vol3.7273>.
- [2] К. Амбаров, С. Танева. Изследване влиянието на пътните съпротивления върху икономичните показатели на лек автомобил, Научно списание "Механика на машините", год. XXXI, кн. 4, 2023, стр. 109-113, ISSN 0861-9727, In Print Only.
- [3] К. Амбаров, С. Танева. Изследване влиянието на надлъжния наклон на пътя върху максималната скорост на движение на лек автомобил, Научно списание "Механика на машините", год. XXXI, кн. 4, 2023, стр. 104-108, ISSN 0861-9727, In Print Only.
- [4] Krasimir Ambarev, Valyo Nikolov. Experimental Study of Toxic Components in the Exhaust Gases During the Operation of a Car Engine with Gasoline and LPG, "Environment.



- Technology. Resources”. Rezekne, Latvia, Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Conference. 2023. Volume 3, pp 20-23, Print ISSN 1691-5402, Online ISSN 2256-070X,
<https://doi.org/10.17770/etr2023vol3.7304>
- [5] Д. Керанов, К. Амбаров. Конвертиране на бензинов двигател за работа с втечен нефтен газ, МЛАДЕЖКИ ФОРУМ „НАУКА, ТЕХНОЛОГИИ, ИНОВАЦИИ, БИЗНЕС“, 2022 пролет, 26 - 27 май 2022 г., Дом на науката и техниката - Пловдив, СБОРНИК ДОКЛАДИ, стр. 85-88, ISSN 2367 – 8569p
https://hst.bg/Mladejki_Forum_26-27_05_2022.pdf.
- [6] В. Николов, К. Амбаров, Н. Пайтаков. Симулационен модел на процесите от работния цикъл на четиритактов двигател с вътрешно горене, Младежки форум „НАУКА, ТЕХНОЛОГИИ, ИНОВАЦИИ, БИЗНЕС“ 2022 – есен, 24-25 ноември 2022 година, СБОРНИК ДОКЛАДИ, Пловдив, 2022, стр. 183-188, ISSN 2367-8569,
https://hst.bg/Mladejki%20forum_2022.%20esen_sbornik.pdf.
- [7] К. Амбаров, Г. Алексиев. Някои възможности за увеличаване на мощността на дизелов двигател, Младежки форум „НАУКА, ТЕХНОЛОГИИ, ИНОВАЦИИ, БИЗНЕС“ 2023 – пролет 27-28 април 2023 година, СБОРНИК ДОКЛАДИ, Пловдив 2023, стр. 182-185, ISSN 2367-8569,
https://hst.bg/Mladejki%20forum%202023%20-%20prolet_sbornik.pdf.
- [8] С. Славчева, С. Танева. Теоретично определяне на необходимите параметри на хидродинамичен трансформатор на лек автомобил, МЛАДЕЖКИ ФОРУМ „НАУКА, ТЕХНОЛОГИИ, ИНОВАЦИИ, БИЗНЕС“, 2022 пролет, 26 - 27 май 2022 г., Дом на науката и техниката - Пловдив, СБОРНИК ДОКЛАДИ, стр. 81-84, ISSN 2367 – 8569,
https://hst.bg/Mladejki_Forum_26-27_05_2022.pdf.
- [9] S. Taneva, K. Ambarev. Side slip of wheels with low and ultra-low profile tires of a personal car negotiating a turn Environment. Technology. Resources. Rezekne, Latvia, Proceedings of the 13th International Scientific and Practical Conference. 2021. Volume 3, pp 336-342,
<https://doi.org/10.17770/etr2021vol3.6630>.
- [10] S. Taneva, K. Ambarev, S. Penchev, H. Atanssov. Frequency Analysis of an Arm of Macpherson Suspension on a Passenger Car, "Environment. Technology. Resources." Rezekne, Latvia, Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Conference. 2023. Volume 3, pp 252-256, Print ISSN 1691-5402, Online ISSN 2256-070X",
<https://doi.org/10.17770/etr2023vol3.7277>
- [11] Г. Димитров, С. Танева, С. Пенчев, К. Амбаров. Якостно пресмятане и честотен анализ на носач от окачване тип "МАКФЕРСОН" на лек автомобил, Научно списание "Механика на машините", год. XXXI, кн. 4, 2023, стр. 67-72, ISSN 0861-9727, In Print Only
- [12] Г. Димитров, С. Танева. Топологична оптимизация на носач от окачване тип „МАКФЕРСОН“ на лек автомобил, Младежки форум „НАУКА, ТЕХНОЛОГИИ, ИНОВАЦИИ, БИЗНЕС“ 2023 – пролет 27-28 април 2023 година, СБОРНИК ДОКЛАДИ, Пловдив 2023, стр. 196-199, ISSN 2367-8569,
https://hst.bg/Mladejki%20forum%202023%20-%20prolet_sbornik.pdf
- [13] Б. Котов, С. Пенчев, С. Танева. Методика за определяне на въздушно съпротивление на автомобил в аеродинамична тръба, Младежки форум „НАУКА, ТЕХНОЛОГИИ, ИНОВАЦИИ, БИЗНЕС“ 2023 – пролет 27-28 април 2023 година, СБОРНИК ДОКЛАДИ, Пловдив 2023, стр. 186-190, ISSN 2367-8569,
https://hst.bg/Mladejki%20forum%202023%20-%20prolet_sbornik.pdf.
- [14] С. Танева, К. Амбаров, Х. Атанасов. Температурен анализ на дискове на двоен многодисков съединител на автомобил, Научно списание "Машиностроене и машинознание", год. XVII, кн. 1, бр. 32, 2022, стр. 70-74, ISSN 1312-8612, In Print Only



- [15] С. Славчева, С. Танева. Якостен анализ на детайли от разпределителна кутия на автомобил 4X4, МЛАДЕЖКИ ФОРУМ „НАУКА, ТЕХНОЛОГИИ, ИНОВАЦИИ, БИЗНЕС“, 2022 пролет, 26 - 27 май 2022 г., Дом на науката и техниката - Пловдив, СБОРНИК ДОКЛАДИ, стр. 76-80, ISSN 2367 – 8569, https://hst.bg/Mladejki_Forum_26-27_05_2022.pdf.
- [16] С. Славчева, С. Танева. Температурен анализ и якостно пресмятане на детайли от планетна предавателна кутия на лек автомобил 4X4, Младежки форум „НАУКА, ТЕХНОЛОГИИ, ИНОВАЦИИ, БИЗНЕС“ 2023 – пролет 27-28 април 2023 година, СБОРНИК ДОКЛАДИ, Пловдив 2023, стр. 191-195, ISSN 2367-8569, https://hst.bg/Mladejki%20forum%202023%20-%20prolet_sbornik.pdf.
- [17] G. Valkov, V. Nikolov. Analysis of the Power Drives of Terrain Forklifts, "Environment. Technology. Resources". Rezekne, Latvia, Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference. 2019. Volume III, pp 241-248, <http://dx.doi.org/10.17770/etr2019vol3.4197>
- [18] V. Stoyanov, V. Nikolov, M. Mirabal Garcia. Numerical study of heat transfer between impinging gas jets and solid surfaces, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 618, pp 1-8, 8th International Scientific Conference "TechSys 2019" – Engineering, Technologies and Systems 16–18 May 2019, Plovdiv, Bulgaria, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/618/1/012064>
- [19] G. Valkov, V. Nikolov. Analysis of stresses and deformations in the chassis of rough terrain forklifts. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 878, pp 1-9, 9TH INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE "TechSys 2020" – ENGINEERING, TECHNOLOGIES AND SYSTEMS 14-16 May 2020, Plovdiv, Bulgaria, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/878/1/012038>.
- [20] V. Stoyanov, V. Nikolov. Numerical study on convective heat exchange between impinging gas jets and solid surfaces, "AIP Conference Proceedings, Volume 24491 September 2022 Article number 050002 10th International Scientific Conference on Engineering, Technologies and Systems, TECHSYS 2021 Plovdiv, 27-29 May 2021", <https://doi.org/10.1063/5.0090995>.
- [21] V. Stoyanov, V. Nikolov. Numerical study of radial high-pressure blower with frequency converter, "AIP Conference Proceedings, Volume 24491, September 2022, Article number 050001, 10th International Scientific Conference on Engineering, Technologies and Systems, TECHSYS 2021 Plovdiv 27 - 29 May 2021", <https://doi.org/10.1063/5.0090994>.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ЛАБОРАТОРИЯ „АВТОМОБИЛНИ МЕХАТРОННИ СИСТЕМИ“ 2024-2029

AUTOMOTIVE MECHATRONIC SYSTEMS LABORATORY 2024-2029

Krasimir Ambarev^{1,2}

Stiliyana Taneva^{1,2}

Valyo Nikolov^{1,2}

Tsvetana Grigorova^{1,2}

Ivan Maradzhiev^{1,2}

*Technical University of Sofia, Plovdiv Branch, 25 Tsanko Dyustabanov Str., Plovdiv, Bulgaria*¹
*Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"*²

Abstract This article presents the main tasks, methods and means for their solution and the expected results of scientific research and their implementation in the Automotive Mechatronic Systems Laboratory during the period 2024 - 2029, primarily with the funds purchased and delivered under the project to the laboratory during the period 2018 - 2023, in the development and research of new and modernized automotive mechatronic systems, both for better power, economic and environmental performance of vehicles and their engines, including with electric and hybrid drive, and for increasing the stability, controllability and safety of movement of vehicles.

Keywords: automotive mechatronic systems, vehicles, cars, internal combustion engines, simulation model, software products.

ВЪВЕДЕНИЕ

През последните години изследователски колективи от различни страни активно работят в насоки, водещи до подобряване на мощностните, икономични и екологични показатели на двигателите с вътрешно горене (ДВГ) чрез оптимизиране на процесите от техния работен цикъл. Развитието на електрониката, автоматиката и компютърната техника спомага за по-доброто управление на горивния процес от работния цикъл при работа на ДВГ с втечен нефтен газ. За намаляване на вредните емисии от транспорта се налага извършване на изследователска работа за оптимизиране на работния цикъл на ДВГ при конвенционал-

ните и хибридни автомобили и по-ефективно използване на електрическата енергия при електрическите и хибридни автомобили. Целта е регулиране на мощността на енергийните преобразуватели; постигане на по-ниски нива на електромагнитни смущения, на по-нисък ток на пулсации и по-малка отделяна топлинна енергия. Изследванията на електродвигателите имат за цел постигане на: голям въртящ момент при растящи параметри на движение, ефективност, надеждност, нисък шум и малки размери. Различни изследователски колективи активно работят в областта на управляемостта, устойчивостта и безопасността при движение на транспортните



средства и в частност върху оптимизиране на параметри и елементи от окачването. Значителна част от изследванията са свързани с определяне на характеристиките на пневматичните гуми на колелата и влиянието им върху траекторията на движение на автомобила.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Целта на настоящия доклад е да се представят основните задачи, методите и средствата за тяхното решаване и очакваните резултати от научни изследвания и тяхната реализация в лаборатория „Автомобилни мехатронни системи“ през периода 2024 – 2029 година, предимно със средствата, закупени и доставени по проекта в лабораторията през периода 2018 – 2023 година, при разработване и изследване на нови и модернизиранни автомобилни мехатронни системи, както за по-добри мощностни, икономически и екологични показатели на транспортните средства и техните двигатели, включително с електрическо и хибридно задвижване, така и за повишаване на устойчивостта, управляемостта и безопасността на движение на транспортните средства.

За постигане на целта ще се изследва и оптимизира работата на мехатронни системи за управление на процесите от работния цикъл на ДВГ и за управление на съвместната работа на ДВГ с трансмисията в лабораторни условия и при пътни изпитвания. Ще се изследват нови и модернизиранни мехатронни системи за повишаване на устойчивостта, управляемостта и безопасността при движение на транспортните средства. Научно-изследователския и приложен аспект при автомобилите с електрическо и хибридно задвижване е свързан с правилното проектиране на енергийните преобразуватели, отдаващи енергия в захранващите батерии. Ключов момент се явява анализирането в динамичен и уста-

новен режим на работа на двупосочни dc/dc преобразуватели и определянето на енергийните загуби, които са основен показател при определяне на плътността на мощността, разходите за охлаждане и свързаните с тях характеристики. Повишаването на ефективността може да окаже значително влияние върху намаляване на загубата на мощност, като съществено влияние оказва технологията на електронните ключове, като GaN или SiC базирани транзистори и методът на управление.

Основни задачи са:

- Изследване характеристиките на съвременните хибридни и електрически автомобили, и използваните в тях електродвигатели, силови преобразуватели, механична част и основни изисквания.
- Разработка на методика за изследване на консумираната и рекуперирана енергия от електрически задвижвано превозно средство.
- Аналитично и симулационно изследване, в динамичен и установен режим, на работата на двупосочни dc/dc преобразуватели и определяне на енергийните загуби.
- Разработка на модели и симулационно тестване на силова топология и електрически двигател.
- Разработка и симулационно изследване на модели на електрически величини - силова топология, електрически двигател, механическа част и управление.
- Моделиране на режимите на работа на електрозадвижвания при различни режими на работа. Анализ на получените резултати.
- Изследване на работния процес при работа на ДВГ чрез снемане на индикаторни диаграми, тяхната компютърна обработка и определяне на влиянието му върху основни параметри, показатели и характеристики при работа с нови, модернизиранни



и модифицирани автомобилни мехатронни системи.

- Изследване и модифициране на нови мехатронни системи за управление на процесите от работния цикъл на ДВГ, определяне на влиянието им върху мощностните, икономични и екологични показатели чрез лабораторни изпитвания.

- Изследване и модифициране на нови мехатронни системи за управление на съвместната работа на двигателя и трансмисията и определяне на влиянието им върху мощностните, икономични и екологични показатели чрез лабораторни и пътни изпитвания.

- Изследване на количеството и потока на енергия, разхода на гориво и екологични показатели при хибридни транспортни средства.

- 3D моделиране, анализи с използване на метода на крайните елементи и изследване на влиянието на някои параметри върху устойчивостта и управляемостта на транспортните средства.

Методите и подходите за решаване на поставените задачи, включват: разработване на математически методи и модели за анализ и определяне на загубите в силовите електронни ключове на преобразувателя в двупосочния DC/DC преобразувател. Съвременни програмни продукти за моделиране и симулиране на преходни процеси, работа в установен режим, загуби по време на преходните процеси, загуби в силовите транзистори на системата батерия - силов електронен преобразувател - двигател.

Методите и подходите, чрез които се постигат поставените задачи за подобряване на мощностните, икономични и екологични показатели при работа на ДВГ и при работа на ДВГ с трансмисията на нови и модернизиран мехатронни системи включват използването на програматор и специа-

лизиран софтуер, изследване на процесите от работния цикъл на ДВГ в лабораторни условия чрез използване на системата за индициране на ДВГ, използване на диностенд, газанализатор, димомер и разходомер.

Методите и подходите за повишаване на устойчивостта и подобряване управляемостта на транспортните средства на нови и модернизиран мехатронни системи включват: разработване на симулационен модел и изследвания чрез използвания на комплекс от експериментални уредби (лабораторни и пътни).

Лабораторията разполага със специализирано оборудване за научни и приложни изследвания, закупено по проекта през първия етап (през периода 2018-2023 година), което ще се използва и през настоящия етап. То включва: система за натоварване на задвижващите колела (фиг.1), комбиниран аналогово-цифров (АЦП) и цифрово-аналогов преобразувател (ЦАП) с USB интерфейс (фиг.2), спирачен стенд и тестер за окачване (фиг.3) и система за индициране на ДВГ, включваща сензор за измерване на налягането на работното вещество в цилиндъра на ДВГ и комбиниран усилвател с преобразувател на сигнала от сензора (фиг.4). Използва се и допълнително оборудване - газанализатор за измерване на токсичните компоненти в отработилите газове на ДВГ (фиг.5).



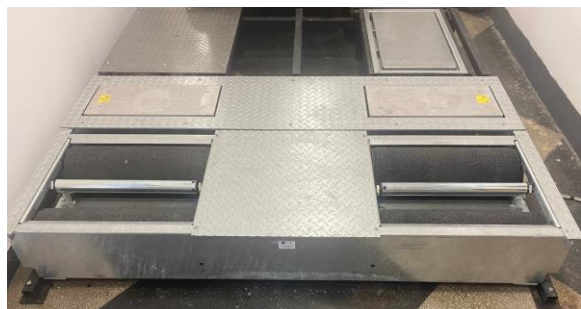
Фиг.1. Динамометричен стенд COSBER 4000



Фиг. 2. АЦП/ЦАП – „NI USB-6343“



Фиг. 5. Газ анализатор „DEK DG-04IR“



Фиг. 3. Спирачен тестер “BEISSBARTH BD640” и тестер за окачването “BEISSBARTH SA640”



а)



б)

Фиг. 4. Сензор за измерване на налягането на работното вещество в цилиндъра на ДВГ – „AVL ZL45“ и комбиниран усилвател с преобразувател на сигнала от сензора – „AVL FI PIEZO, Type 2P2E“

За реализиране на посочените задачи, освен наличното оборудване е предвидено и закупуването на допълнително специализирано оборудване, включително и на автомобил с хибридно задвижване.

В публикациите от 2024 година до сега [1-4] са направени някои симулационни изследвания на компоненти и показатели на бензинови двигатели и на бензинови двигатели, работещи с втечнен нефтен газ.

Проектирани и конструирани са различни уредби, свързани с определяне на показатели и консумативи на ДВГ [5-6].

С цел намаляване вредните емисии от транспорта е обосновано провеждането на научни изследвания за постигане на по-ефективно използване на електрическата енергия с развитието на хибридните и електрически автомобили. На използваните енергийни преобразуватели се извършват проучвания, чиято цел е постигане на висока ефективност, регулиране на мощността на преобразувателя, ниски електромагнитни смущения и др. В [7] е извършено изследване на фазово-управляем мостов DC-DC преобразувател, със синхронен изправител, осигуряващ условия за мека комутация на транзисторите (ZVS-PSFB) с приложение за зареждане на батерии.

Електрическите превозни средства (EV) и хибридните електрически превозни средства (HEV) се утвърждават като ключови технологии в прехода към нисковъглеродна мобилност, благодарение на способността им да преобразуват електрическата

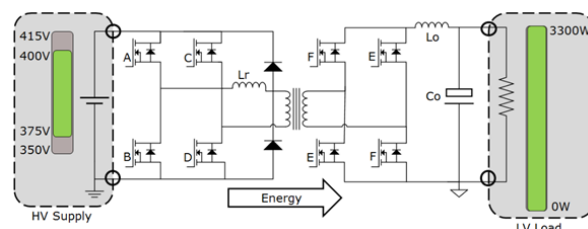
енергия от батериите в механично движение с висока ефективност. Мехатронните системи са от съществено значение за функционирането на електромобилите. Те включват електрически двигатели, електроника за управление на автомобила и системи за безопасност. Структурата на EV включва няколко основни блока: източник на енергия (батерия), електрически преобразуватели, електродвигател и система за управление. При HEV допълнително присъства ДВГ, който работи в синергия с електрическата система. Изборът на електродвигател е критичен за цялостната производителност на превозното средство. Най-често използвани са PMSM и BLDC двигатели, които предлагат висока ефективност, компактност и ниски загуби. Въпреки това, превключваемият реактивен двигател (SRM) и асинхронният двигател също намират приложение поради своята устойчивост и ниска цена, макар и с компромис в акустичния комфорт и управляемостта.

Електрическите преобразуватели играят централна роля в управлението на енергийния поток при електрическите и хибридните автомобили. В електрическите и хибридните автомобили се внедряват и използват многовходови DC-DC топологии, които позволяват интеграция на различни енергийни източници – батерии, суперкондензатори, генератор и слънчеви панели – в една система. Тези решения подобряват гъвкавостта и надеждността на захранването, като същевременно оптимизират енергийната ефективност чрез интелигентно управление на входовете. Недостатъците включват сложност на управлението, повишени загуби при преобразуване и необходимост от допълнителна защита срещу пренапрежения.

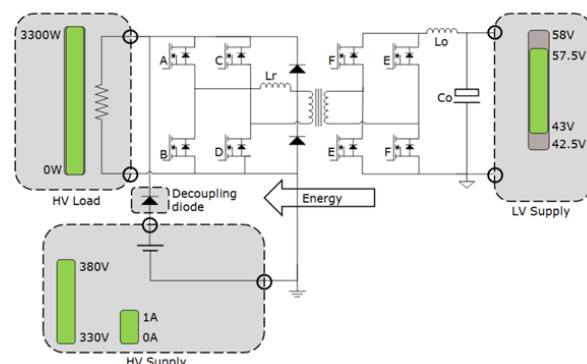
Фиг. 6 показва работа на двупосочен трансформаторен преобразувател с фазово

управление в понижаващ режим на работа и отдаване на енергия към товара.

Фиг. 7 показва работата на същия преобразувател в повишаващ режим на работа и отдаване на енергия от товара към захранващия източник.



Фиг. 6. Двупосочен преобразувател
EVAL_3K3W_BIDI_PSFB в понижаващ режим
на работа [8]



Фиг. 7. Двупосочен преобразувател
EVAL_3K3W_BIDI_PSFB в повишаващ режим
на работа [8]

В работа [9] е изследвана работната температура на двоен многодисков съединител, чрез извършен температурен анализ с използване на МКЕ и чрез проведени експериментални изследвания за определяне на температурата на маслото в предавателната кутия, температурата на охлаждащата течност и температурата на съединителите при съвместната работа на двигателя и трансмисията с диагностична апаратура VCDS и чрез използване на динамометричен стенд (фиг.1) при определени

условия на работа на автомобила – различни пътни съпротивления.

Публикации [10-14] са свързани с проведени експериментални и симулационни изследвания на параметри и компоненти от независими окачвания на леки автомобили, които могат да се приложат и при изследване и модифициране на механичните им системи за управление и контрол на окачвания. При експерименталното изследване на трептенията на компоненти от окачването е използван тестерът за окачване, който е част от системата представена на фиг. 3, а преобразуването на аналоговия електрически сигнал в цифров е реализирано чрез използване на АЦП, показано на фиг. 2.



Фиг. 8. DC Power Supply

При провеждане на експериментите е използван захранващ блок (DC Power Supply), на фирмата V&A Instruments, модел HY1803D, показан на фиг. 8.

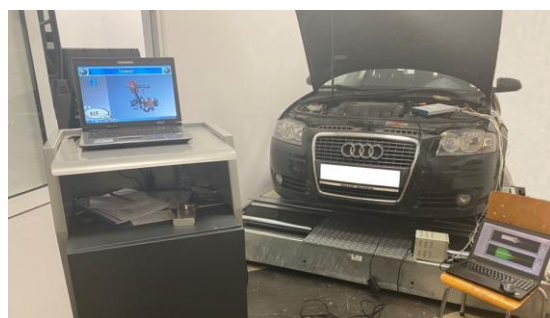
Използван е и акселерометър ADXL335 (фиг. 9), производство на фирмата „Analog Devices“, който измерва едновременно ускоренията по трите оси x, y, z.



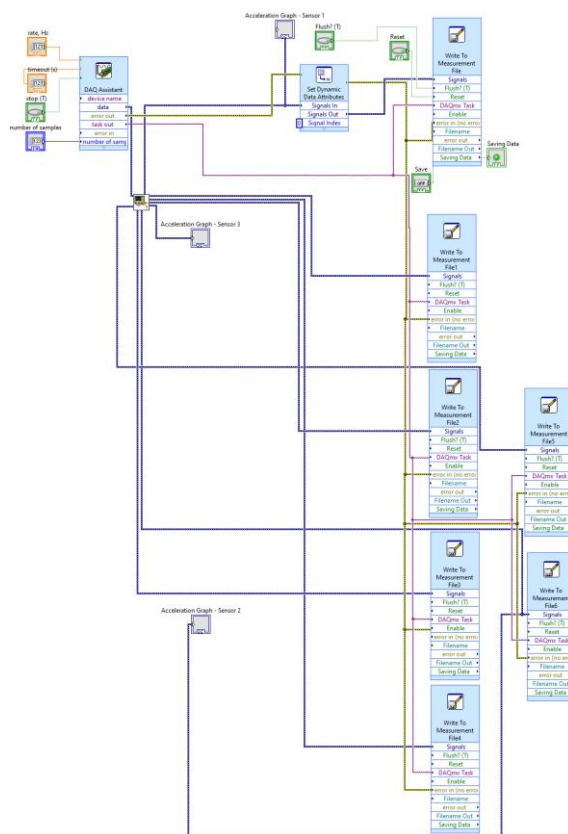
Фиг. 9. Акселерометър ADXL335

На фиг. 10 е показано цялостното оборудване за определяне на параметри на трептения на окачване на автомобил при лабораторно изпитване.

Разработен е и виртуален прибор с програмата LabView, структурната му схема е показана на фиг. 11, а на фиг. 12 - предния панел на виртуалния прибор. За допълнителна обработка на данните е използвана на програмата Matlab.



Фиг. 10. Експериментално оборудване



Фиг. 11. Блок-схема на виртуалния прибор в LabVIEW



Фиг. 12. Преден панел на виртуалния измервателен прибор

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата статия са представени основните задачи, методите и средствата за тяхното решаване и очакваните резултати от научни изследвания и тяхната реализация в лаборатория „Автомобилни мехатронни системи“ през периода 2024 – 2029 година, предимно със средствата, закупени и доставени по проекта в лабораторията през периода 2018 – 2023 година, при разработване и изследване на нови и модернизирани автомобилни мехатронни системи, както за по-добри мощностни, икономически и екологични показатели на транспортните средства и техните двигатели, включително с електрическо и хибридно задвижване, така и за повишаване на устойчивостта, управляемостта и безопасността на движение на транспортните средства.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност,, "Интелигентни мехатрон-

ни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Д. Керанов, К. Амбаров. Дозиращи системи с адитиви за предпазване на клапаните на бензинови двигатели, работещи с втечен нефтен газ, Младежки форум „Наука, технологии, иновации, бизнес“, 2025 – пролет, град Пловдив, България, стр. 244-248, ISSN 2367-8569.
- [2] K. Ambarev, S. Taneva. Thermal and Structural Analysis of Gasoline Engine Piston at Different Boost Pressures. Eng. Proc. 2025, 100, 38.
<https://doi.org/10.3390/engproc2025100038>.
- [3] С.Танева, К. Амбаров. Топлин анализ на бутало от бензинов двигател с вътрешно горене, Механика на машините, година XXXIII, книга 1, 2025, стр. 85-91, ISSN 0861-9727.
- [4] К. Амбаров, А. Тунев, С. Танева. Симулационно изследване на някои показатели на бензинов двигател при работа с различни разпределителни валове, МЛАДЕЖКИ ФОРУМ „НАУКА, ТЕХНОЛОГИИ, ИНОВАЦИИ, БИЗНЕС“ 2024 – есен, Пловдив, стр. 238-243, ISSN 2367-8569.
- [5] A. Tashev, E. Dimitrov. Design and construction of test benches for gas-diesel cycle engines. Journal of Environmental Protection and Ecology 25, No 8, Pages: 2725 - 2732 (2024).
- [6] P. Mitev, A. Tashev, Y. Stoyanov. Design and Construction of an Engine Oil Viscosity Meter with Electronic Control. Engineering Proceedings. 2025, 100, 55.
- [7] T. Grigorova, G. Bodurov, M. Dobrolitsky. A Study on a Phase-Shift Controlled ZVS DC-DC Converter with a Synchronous Rectifier. Eng. Proc. 2025, 100, 43.
<https://doi.org/10.3390/engproc2025100043>.
- [8] <https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/24/42/infineon-evaluation-board-eval-3k3w-bidi-psfb-applicationnotes-en.pdf>
- [9] S. Taneva, K. Ambarev, H. Atanasov, Study of the Operating Temperature of a Double Multi-Disc Clutch of a Passenger Car, AIP Conf. Proc. vol 2980, 050005 (2024).



- [10] S. Taneva, K. Ambarev. Study of the Vibrations of MacPherson Suspension Components, AIP Conf. Proc. 3274, 060006 (2025) <https://doi.org/10.1063/5.0259301>.
- [11] K. Ambarev, S. Taneva. A Comparative Study of Vibrations in Front Suspension Components Using Bushings Made from Different Materials. Eng. Proc. 2025, 100, 42. <https://doi.org/10.3390/engproc2025100042>.
- [12] К. Амбаров, С. Танева, Сравнителен анализ на трептения в елементи на окачване тип Макферсон при различни характеристики на виброизолаторите, МЛАДЕЖКИ ФОРУМ „НАУКА, ТЕХНОЛОГИИ, ИНОВАЦИИ, БИЗНЕС“ 2024 – есен, Пловдив, стр. 251-255, ISSN 2367-8569.
- [13] С. Танева, С. Пенчев, К. Амбаров, Якостно изчисляване на двулостово окачване на лек автомобил, МЛАДЕЖКИ ФОРУМ „НАУКА, ТЕХНОЛОГИИ, ИНОВАЦИИ, БИЗНЕС“ 2024 – есен, Пловдив, стр. 244-250, ISSN 2367-8569.
- [14] С. Танева, К. Амбаров, Якостен и деформационен анализ на задно независимо окачване на спортен автомобил, Механика на машините, година XXXII, №1, стр. 113-117, ISSN 0861-9727.
- [15] Y. Stoyanov, A. Tashev, P. Mitev, Design of a Forklift Hydraulic System with Unloading Valves for Load Handling, Engineering Proceedings. 2025, 104, Issue 1, 85.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

НАУЧНОИЗСЛЕДОВАТЕЛСКА И ПРИЛОЖНА ЛАБОРАТОРНА КОНФИГУРАЦИЯ СЪС ИНДУСТРИАЛЕН РОБОТ И МАШИНА С ЦПУ

HYBRID RESEARCH AND APPLICATION LABORATORY PLATFORM FEATURING INDUSTRIAL ROBOTICS AND CNC MANUFACTURING TECHNOLOGIES

Tihomir Stoyanov^{1,2,a}, Sevil Ahmed-Shieva^{1,2,b}, Nikola Shakev^{1,2,c}, Katya Madzharova-Atanasova^{1,2,d}, Tanya Titova-Kosturkova^{1,2,e}, Borislav Penev^{1,2,f}, Radoslav Hrishev^{1,2,g} and Andon Topalov^{1,2,h}

¹Faculty of Electronics and Automation, Technical University of Sofia, Plovdiv Branch

²Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

a) stoyanov.tihomir@tu-plovdiv.bg; b) sevil.ahmed@tu-plovdiv.bg; c) shakev@tu-plovdiv.bg;
d) kmadzarova@tu-plovdiv.bg; e) t.titova@tu-plovdiv.bg;
f) bpenev@tu-plovdiv.bg; g) hhrishev@tu-plovdiv.bg; h) topalov@tu-plovdiv.bg

Abstract

The paper is devoted to the current state, research directions and authors' view for the future development of the Laboratory complex "Robotics and Intelligent Automation Systems". A research and application-oriented laboratory configuration integrating an industrial robot and a CNC machine is presented. Computer Numerical Control (CNC) machines are an essential component of modern industry, widely used in sectors such as metal cutting, laser engraving, welding, and beyond. In parallel, according to the International Federation of Robotics, the global number of industrial robots has been growing exponentially over the past decade—by more than 10% annually. In light of these trends and the rapid advancements in artificial intelligence, there is a growing need for research and implementation of algorithms enabling the coordinated control of these two core components in automated systems—CNC machines and industrial robots. The development of reliable algorithms for their collaborative operation is a key prerequisite for enhancing productivity, quality, and responsiveness in modern manufacturing environments.

Keywords: Industrial robot, CNC machine, Robot-CNC machine collaboration.

ВЪВЕДЕНИЕ

Настоящият доклад представя научно-изследователска лабораторна конфигурация със индустриален робот и машина с ЦПУ, която е част от лабораторен комплекс „Роботика и интелигентни системи за автоматизация“ към Център за компетентност “Интелигентни мехатронни, еко- и

енергоспестяващи системи и технологии“ на територията ТУ-София, филиал Пловдив.

Машините с цифрово-програмно управление (ЦПУ, CNC) са неизменна част от съвременната индустрия в сфери като, металорязането, лазерно гравирание и заваряване, и много други. От друга страна спо-



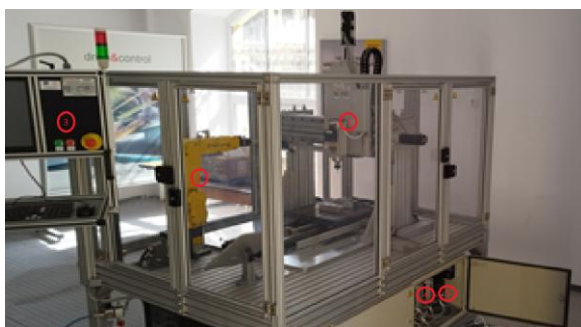
ред Международната федерация по роботика броят на индустриалните роботи в световен мащаб се увеличава лавинообразно през последните 10 години – с над 10% на година [1].

Следвайки тези тенденции и напредъка в областта на изкуствения интелект се засилва необходимостта от изследвания и внедрявания на алгоритми за съвместно управление на тези два основно компонента в една автоматизирана система – машините с ЦПУ и индустриалните роботи. Наличието на надеждни алгоритми, които позволяват съвместната им работа е предпоставка за увеличаване на производителността, качеството и бързодействието на съвременното производство.

ХАРДУЕРНА КОНФИГУРАЦИЯ

Научно-изследователската лабораторна конфигурация (Фиг. 1.) се състои от:

- *три-осна CNC машина(1);*
- *шест-осен манипулатор – Fanuc LR Mate 200iD(2);*
- *пулт за управление на CNC машината(3)*
- *серво задвижвания - ELAS - DA2(4);*
- *Честотен преобразувател – DELTA MS300(5).*



Фиг. 1. Научно-изследователска лабораторна конфигурация със индустриален робот и CNC машина.

1. Индустриален робот - Fanuc LR Mate 200iD.

Fanuc LR Mate 200iD (Фиг.2.) представлява шест-осен индустриален робот, който има следните основни технически данни [6]:

- *Максимална товароносимост: 7 кг*
- *Максимален обсег: 717 mm*
- *Степени на свобода: 6*
- *Инсталационна поза: възможност за монтаж на под, таван или стена.*



Фиг. 2. Индустриален робот – Fanuc LR Mate 200iD.

Пултът за управление на робот Fanuc (Фиг. 3.) е свързан с кабел към електрическото табло под самия робот, където се намира и контролерът му. Роботът е настроен да работи в автоматичен режим в синхрон със CNC машината.



Фиг. 3. Подвижен пулт за управление на робот – Fanuc LR Mate 200iD.

2. CNC машина.

Три-осната CNC машина (Фиг. 4.) се управлява чрез пултът за управление (Фиг. 5.), който е оборудван със 17” тъч панел, мишка и клавиатура.



Фиг. 4. CNC машина.

Оборудван е със „START“, „STOP“ и „EMERGENCY STOP“ бутони.

С бутон „START“ се стартира, а с бутон „STOP“ се спира работа в автоматичен цикъл. „EMERGENCY STOP“ бутон служи за аварийно спиране на машината и работата при възникване на опасност.



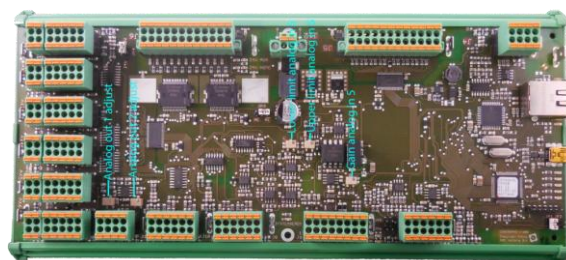
Фиг. 5. Пулт за управление на CNC машина.

Различните функции за управление могат да се активират, както от тъч панела, така и чрез мишката и клавиатурата.

Пултът е изработен ергономично и може да се мести и фиксира в удобна за оператора позиция.

3. Управляващо устройство - Eding CNC 600i.

CNC машината се управлява от управляващо устройство - Eding CNC 600i (Фиг. 6.). Управляващото устройство може да управлява до шест оси и е предназначено за индустриални приложения. Управлението поддържа всички стандартни G, M и S машинни кодове. Максималната работна честота на всяка от осите е 125kHz.



Фиг.6. CNC 600i.

4. Серво задвижвания - ELAS - DA2.

3-те оси на CNC машината се задвижват от серво управления ELAS - DA2 (Фиг. 7.). Основните технически данни на серво управленията са [2]:

- Захранващо напрежение – 200-230, V;
- Честота на захранващото напрежение – 50/60, Hz;
- Номинално изходно напрежение- 200-230, Vac ~ 0-200, Hz (зависи от входното напрежение);
- Номинален изходен ток – 3,5-6,5, A (зависи от мощността на двигателя);
- Максимален изходен ток – 10-15, A (зависи от мощността на двигателя);
- Мощност на двигателя – 0,55-1,1, kW.



Фиг. 7. Серво управление - ELAS DA2.

5. Честотен преобразувател – DELTA MS300.

Шпиндел мотора се управлява от честотен преобразувател DELTA MS300 (Фиг. 8.). Основните технически данни на честотния преобразувател са [3]:

- Номинално захранващо напрежение – 200-240, Vac;

- Честота на захранващото напрежение – 50/60, Hz;
- Диапазон на изходната честота – 0-599, Hz;
- Диапазон на изходното напрежение – 0-230, V;
- Приложим изходен ток – 12,5, A;
- Приложима изходна мощност – 2,2, kW/ 3, hp



Фиг. 8. Честотен преобразувател – DELTA MS300.

Те са настроени и работят в автоматичен режим.

6. Защитна система.

Лабораторната конфигурация има 8 заключващи се механично врати, допълнително осигурени и с магнитни сензори за безопасност – Фиг. 9.



Фиг. 9. Магнитни сензори за безопасност – Telemecanique XCSZC1 .

Лабораторната конфигурация разполага и със светлинна колона (Фиг.10.) – сигнализираща за работното състояние на системата.

Зелена светлина:

- мига в зелено при работа;
- свети постоянно в зелено при избран режим “AUTO”.

Червена светлина:

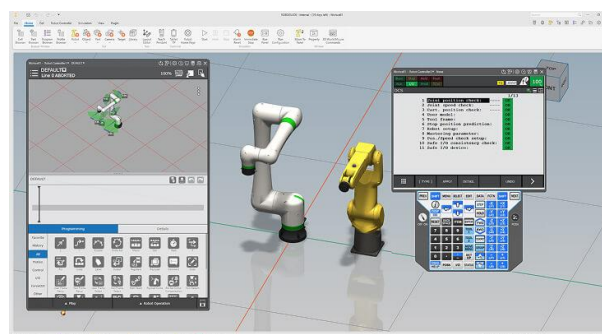
- мига в червено при активирана аларма;
- свети постоянно в червено при задействан аварийен стоп.



Фиг. 10. Светлинна колона.



Фиг. 11. Подвижен пулт за управление - R-30iB.



Фиг. 12. Изглед на специализираният софтуер - ROBOGUIDE.

2. Софтуер за програмиране на CNC машината – EdingCNC.

Специализираният софтуер за програмиране на CNC машината – EdingCNC (Фиг. 13.), предоставя възможност за използване на функционалности, като [4]:

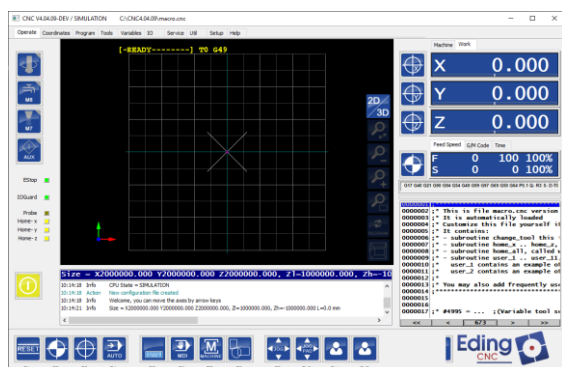
- Най-кратко възможно време за CNC производство, благодарение на алгоритъма - **Look Ahead Feed**;
- Изпълнение на режим на влагане за множество продукции;
- Оптимизирани изчисления на подаването на върха на инструмента за фрезование по 4-та ос, без счупване на инструмента поради неправилно подаване на върха на инструмента;
- Компенсация на обратния удар;
- Пропорционално време за разгръщане на шпиндела;
- Откриване на колизии при зареждане на G-код, задача предо-

СОФТУЕРНО ОБЕЗПЕЧАВАНЕ

1. Софтуер за програмиране на робот – Fanuc LR Mate 200iD.

Шест-осният манипулатор – Fanuc LR Mate 200iD, може да бъде програмиран както чрез подвижния пулт за управление - R-30iB (Фиг. 11.), който е обезпечен със софтуер FANUC Robotics, така и чрез официалния софтуер за програмиране и симулиране на роботизирани системи на Fanuc – ROBOGUIDE (Фиг. 12.). Софтуерът ROBOGUIDE предоставя възможност за проектиране, тестване и оптимизация на цели роботизирани системи, дори и без наличието на физически робот [5].

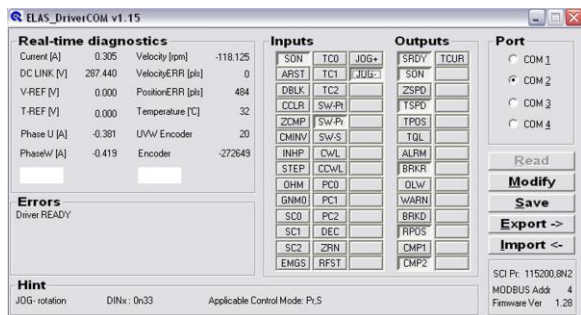
твряваща повреда на машината.



Фиг. 13. Изглед на специализираният софтуер - EdingCNC.

3. Софтуер за програмиране на серво управления – DriverCom.

Специализираният софтуер за програмиране на серво управленията е – DriverCom (Фиг. 14.). Представя диалогово приложение позволяващо наблюдение и настройка на основните параметри на серво задвижването. Предоставя възможност за управление по скорост, позиция и въртящ момент.

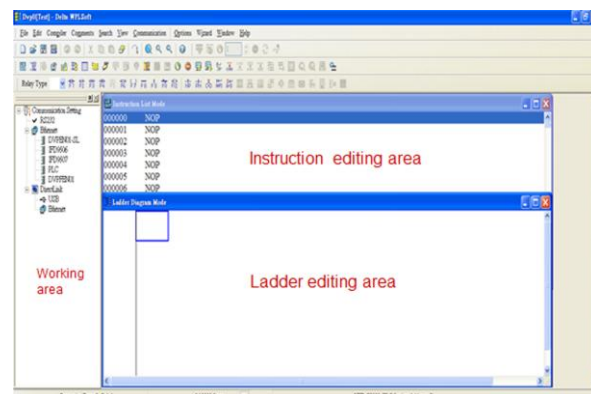


Фиг. 14. Изглед на специализираният софтуер - DriverCom.

4. Софтуер за програмиране на честотният преобразувател – WPLSoft.

Специализираният софтуер за програмиране на честотният преобразувател е – WPLSoft (Фиг. 15.). Този софтуер позволява използването и на PLC функционалностите на честотния преобразувател. Пред-

ставя възможност за използване на два метода за програмиране – чрез използване на ладер диаграми или чрез използването на командни редове.



Фиг. 15. Изглед на специализираният софтуер - WPLSoft.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представената научноизследователска лабораторна конфигурация със индустриален робот Fanuc LR Mate 200iD и машина с ЦПУ създава условия както за развойна така и изследователска дейност. Някои от планираните изследвания в активно сътрудничество с местни и чуждестранни университети, научни организации и бизнеса като се осъществяват висококачествени приложно-ориентирани изследвания и технологичен и научен трансфер на знания, са:

- Разработка на нови алгоритми за интелигентно управление на захващащи механизми с използване на подходи от изкуствения интелект (машинно обучение, размита логика, невронни мрежи и др.).
- Разработка и внедряване на структури на системи за прецизно позициониране с приложение в робототехническите системи (вкл. и при мобилни роботи).

Фиг. 18. Представа етапи от съвместната работа на индустриалния робот конфигурация със индустриален робот Fanuc LR



Mate 200iD и машина с ЦПУ при задача за гравирание върху метални плочи.



Фиг. 16. Гравирание

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

- [1] https://ifr.org/downloads/press2018/Press_Conference_2024.pdf
- [2] https://www.electroinvent.com/wpcontent/uploads/Servo_drive_manual_150320111.pdf
- [3] Delta Standard Compact Drive MS300 Series User Manual
- [4] <https://edingcnc.com>
- [5] <https://www.fanucamerica.com/products/robots/roboguide>
- [6] <https://www.fanucamerica.com/products/robots/series/lr-mate/lr-mate-200id>



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ЛАБОРАТОРИЯ „ИНТЕГРИРАНИ СИСТЕМИ ЗА ПРОЕКТИРАНЕ И ПРОИЗВОДСТВО В АВТОМОБИЛНАТА ИНДУСТРИЯ“ 2018-2023

LABORATORY „INTEGRATED SYSTEMS FOR DESIGN AND PRODUCTION IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY“ 2018-2023

Valyo Nikolov^{1,2}

Pepo Yordanov^{1,2}

*Technical University of Sofia, Plovdiv Branch, 25 Tsanko Dyustabanov Str., Plovdiv, Bulgaria*¹
*Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"*²

Abstract

An overview of the possibilities for execution research and innovation programs of the laboratory „Integrated systems for design and production in the automotive industry“ at the Center of Competence „Smart mechatronic, eco- and energy-saving systems and technologies“, revealed within the framework of the implementation of a project under contract BG05M2OP001-1.002-0023-C01. The areas of scientific research and publications for the period 2018-2023 are summarized.

Keywords: Automotive Industry; Center of Competence.

ВЪВЕДЕНИЕ

Лаборатория „Интегрирани системи за проектиране и производство в автомобилната индустрия“ е една от лабораториите, разположени на територията на трети и четвърти учебен корпус на ТУ-София, филиал Пловдив. Тя е част от Центъра за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“, разкрит в рамките на изпълнение на проект по договор BG05M2OP001-1.002-0023-C01, финансиран от Оперативна програма „Наука и образование за интелигентен растеж 2014-2020“, съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейските структурни и инвестиционни фондове. Периодът на изпълнение на проекта е 30.03.2018 – 30.11.2023 г.

Изграждането на лабораторията започна на 26 юни 2019 г. с официална церемония „Първа копка“, с която стартира ремонтът и преустройството на част от съществуващата сграда на Технически университет - София, филиал Пловдив - Трети учебен корпус.

Официалното откриване на лабораторните комплекси и друга инфраструктура е извършено на 29.05.2021 г. на церемония, състояла се в двора на сградата на ТУ-София, филиал Пловдив на ул. "Цанко Дюстabanов" № 8.

Подборът на изследователския състав на лабораторията започна и се извърши на етапа на подготовка на проектното предложение през периода 2016 - 2017 година, а назначаването се реализира през 2020 го-



дина. Освен предвидените научни проучвания и изследвания, изследователите извършват подготовка на технически спецификации за обявяване на обществени поръчки, организация на доставките, монтажа, въвеждането в експлоатация на оборудването и участват в обученията на специалисти за работа с него от фирмите – доставчици.

ИЗЛОЖЕНИЕ

В периода на изпълнение на проекта лаборатория „Интегрирани системи за проектиране и производство в автомобилната индустрия“ е обзаведена със следните научноизследователски машини и съоръжения, със съответния специализиран софтуер.

1. Система за изследване, адаптивно управление и оптимизация на производствения процес на детайли в автомобилостроенето (фиг. 1)



Фиг. 1. Струговофрезови център ST10Y

Основният компонент на тази система е високопроизводителен двушпинделен струговофрезови център с ЦПУ, Y и C оси, ST10Y на фирмата HAAS AUTOMATION (USA). Допълнителният шпиндел (фиг. 2) позволява окончателни обработки без снемане на детайла.



Фиг. 2. Работно пространство на ST10Y

Дванадесетпозиционната хибридна револверна глава (фиг. 2) позволява използването на шест стругови и шест въртящи се инструменти. Това разширява възможностите на машината за извършването на струговане, фрезоване, пробиване на отвори и нарязване на резби. Наличието на Y и C оси позволява обработването на сложни повърхнини, а автоматизираната система за измерване на инструмента – проследяване на неговото износване в процеса на изработка.

В научните изследвания е предвидено тази система да се използва за оптимизация на технологичните процеси, разработване на стратегии за адаптивно управление и нови инструменти.

2. Високоскоростен вертикален обработващ център с ЦПУ и 5 управляеми оси (HAAS UMC 500 SS)

Обработването по 5 оси е ефективно средство за намаляване броя на настройките и повишаване на точността при сложни детайли и детайли с много външни



повърхнини. По-късите ходове на универсалния обработващ център HAAS UMC 500 SS (фиг. 3) позволяват 3+2 осно обработване и едновременно обработване по 5 оси на компактни детайли. UMC 500 SS е оборудвана с високоскоростен шпиндел, устройство за смяна на инструменти и въртяща маса тип люлка (В и С оси) с цел намаляване времето на програмата и повишаване на производителността.



Фиг. 3. Вертикален обработващ център UMC 500 SS

Системата за автоматизирано измерване на детайла и инструмента дава широки възможности за научни изследвания в областта на настройките и поднастройките на машини с ЦПУ, усъвършенстването на процеса на обработка и подобряване на качеството на обработваните детайли.

3. 3D скенер (Artec Leo)

Сканирането в 3D е мощен инструмент за преобразуването на сложни физически повърхнини в CAD формат. Скенерът Artec Leo (фиг. 4) е предназначен за високоскоростно цифровизиране на реални, както

малки механични, така и голямо габаритни детайли. Получените геометрични модели в STEP, IGES или X_T формати подлежат на следваща обработка с CAD/CAM/CAE софтуер, с цел научни изследвания чрез симулации, генериране на машинен код и изработкана детайли с металорежещи машини или адитивни технологии.



Фиг. 4. 3D скенер Artec Leo

3. Система за прототипиране на 3D детайли в автомобилостроенето

Системата за прототипиране на 3D детайли в автомобилостроенето е предназначена за изработване на сложни пространствени метални детайли за нови и модернизирани автомобилни мехатронни системи чрез адитивна технология. Основен компонент на тази система е 3D принтер за метали EP-M260 (фиг.5).



Фиг. 5. 3D принтер за метали EP-M260



Принтерът работи по технология по-сложно изграждане на детайли от метал чрез селективно лазерно топене в прахово легло (Metal Powder Bed Fusion, Selective Laser Melting). Принтерът може да се използва с широка гама материали – мартензитни и неръждаеми стомани; алуминиеви, медни, титанови, никелови, кобалт-хромови сплави и др. Предвидените научни изследвания са в областта на възможностите за приложение на технологията в индустриалното производство, качеството и механичните характеристики на изработените детайли, влиянието на следващи механични и термични обработки и др.

4. Плоскошлифовъчна SHPH 30.63

Универсалната плоскошлифовъчна машина с PLC управление (фиг. 6) е предназначена за подготовка на изграждащите плочи на 3D принтера за метали EP-M260.



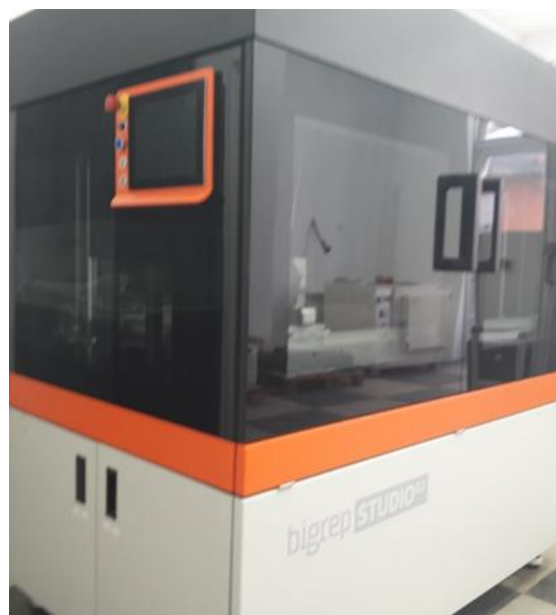
Фиг. 6. Плоскошлифовъчна машина SHPH 30.63

Освен това тази машина е предвидена за обработване и изследване на други индустриални изделия с плоски повърхнини.

5. 3D принтер за неметали BigRep STUDIO G2

Неметалните материали (пластмаси и композитни материали) намират широко приложение в съвременните автомобили.

Технологията на 3D принтирането навлиза в индустриалното производство на детайли от тези материали поради възможността за получаване на олекотени изделия с достатъчна якост.



Фиг. 7. 3D принтер за неметали BigRep STUDIO G2

Широкоформатния (с работно пространство 500x1000x500 mm) принтер BigRep STUDIO G2 (фиг.7) позволява печат на големи детайли с висока разделителна способност (0,1-0,4 mm) от висококачествени материали (PLA, ABS, ASA, BVON, HI-TEMP, HI-TEMPcf, PLX, PETG, ProHT, TPU, PA6/66 и др.) по технологията FDM/FFF (Fused Deposition Modeling/ Fused Filament Fabrication). Разнообразието на използваните материали, контролираните параметри на печатния процес и температури

на екструдерите (2 бр.), работната маса, работната камера и контейнера за съхранение на филамента дават широки възможности за научни изследвания на множество характеристики на качеството на печата и готовите изделия.

6. Машина за термична обработка на детайли, изработени с 3D принтер

Машината за термична обработка на детайли, която е програмируема муфелна пещ Witeg FHP 63 (фиг.8), е предназначена за научни изследвания на влиянието на термичната обработка върху структурата и механичните характеристики на детайли, произведени чрез технологиите на 3D принтирането.



Фиг. 8. Програмируема муфелна пещ Witeg FHP 63

През периода 2022-2023 г. от изследователския състав на лаборатория „Интегрирани системи за проектиране и производство в автомобилната индустрия“ са извършени научни изследвания, като получените резултати от тях са представени в 24 научни публикации в страната и чужбина, 7 от които са реферирани в световните бази данни.

Основните области на проведените научни изследвания са:

1. Адитивни технологии за производство и механични характеристики на полимерни изделия

- изследване на влиянието на скоростта на печат и дебелината на слоя върху точността на отвори и адхезията между слоевете при 3D печат [1], [2] [3];
- изследване на механичните характеристики на полимерни изделия с приложение в пътното строителство [4];
- определяне на статичния и динамичния модул на линейни деформации на армирани полимербетонни композити с епоксидна матрица и минерални дисперсионни пълнители [5], [6], [7].

2. Технологии за обработка чрез рязане на свръхтвърди материали

- математично моделиране на кинематиката и динамиката на дискова система за вибрационно рязане на оптични заготовки [8], [9];
- експериментално изследване на грапавостта на повърхнините при вибрационно рязане на оптични заготовки [10].

3. Структура, термична и механична обработка, механични характеристики на метали и модифицирани алуминиеви сплави с приложение в автомобилостроенето

- анализ на влиянието на термичната обработка върху структурата и механичните характеристики на модифицирани алуминиеви сплави [11], [12];
- експериментални изследвания на влиянието на термичната обработка върху структурата и механичните характеристики на детайли от Cu 99.9, изработени чрез студена пластична деформация [13];
- изследвания на корозията на модифицирани алуминиеви сплави в агресивни среди [14], [15];



4. Теоретични изследвания на поведението на модифицирани алуминиеви сплави с САЕ софтуер при статични и циклични натоварвания

- изследване на влиянието на различни термични обработки върху поведението на модифицирани алуминиеви сплави при комбинирани статични натоварвания [16], [17];
- изследване на умората и пукнатиноустойчивостта на модифицирани алуминиеви сплави при различни режими на термообработка [18], [19];

5. Технологии за механична обработка, адаптивно управление и активен контрол, металорежещи инструменти при многоосни стругови и фрезови машини с ЦПУ

- изследване на влиянието на микроструктурата на материала и геометрията на режещия инструмент върху качеството на обработваните повърхнини при детайли от алуминиеви сплави [20], [21];
- методика за адаптивно управление и активен контрол при фрезоване на правоъгълен джоб [22];
- изследване на стабилността при обработване на вътрешни ротационни повърхнини със струг с ЦПУ [23];
- експериментално и теоретично изследване на собствените честоти на антивибрационна щанга [24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Високотехнологичното оборудване и експертизата на изследователския състав на лаборатория „Интегрирани системи за проектиране и производство в автомобилната индустрия“ е предпоставка за извършване на научни изследвания не само в горепосочените области, но и в други направления на автомобилостроенето.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Sabi Sabev, Valeri Bakardzhiev. Application of Taguchi Method for Analyzing the Dimensional Accuracy in 3D Printing. Association Science and Technology Unions and House of Science and Technique - Plovdiv, Bulgaria. Proceedings of the Youth Forums "Science, Technology, Innovation, Business - 2022", 24-25 November 2022, pp 145-148, ISSN 2367 – 8569 (in Bulgarian).
- [2] Valeri Bakardzhiev, Sabi Sabev, Konstantin Chukalov, Plamen Kasabov. Research into the Accuracy of Holes in 3D Printing Using Taguchi Method. "Environment. Technology. Resources". Rezekne, Latvia, Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Conference. 2023. Volume 3, pp 36-40, Print ISSN 1691-5402 Online ISSN 2256-070X.
- [3] Valeri Bakardzhiev, Sabi Sabev, Plamen Kasabov, Konstantin Chukalov. Research into 3D Printing Layer Adhesion in ABS Materials. "Environment. Technology. Resources". Rezekne, Latvia, Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Conference. 2023. Volume 3, pp 41-45, Print ISSN 1691-5402, Online ISSN 2256-070X.
- [4] Sabi Sabev, Plamen Kasabov, Konstantin Chukalov, Valeri Bakardzhiev. Influence of Adding Polypropylene (PP) into Polyethylene (PE) on Mechanical Properties of Geocells. "Environment. Technology. Resources". Rezekne, Latvia, Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Conference. 2023. Volume 3, pp 214-218, Print ISSN 1691-5402, Online ISSN 2256-070X.



- [5] Sabi Sabev, Plamen Kasabov. Design and Make of a Stand to Determine the Static Module of Elasticity. Association Science and Technology Unions and House of Science and Technique - Plovdiv, Bulgaria. Proceedings of the Youth Forums "Science, Technology, Innovation, Business - 2022", 26-27 May 2022, pp 44-47, ISSN 2367 – 8569 (in Bulgarian).
- [6] Sabi Sabev, Plamen Kasabov, Konstantin Chukalov, Valeri Bakardzhiev. Determination of the Dynamic Modulus of Linear Deformations of Reinforced Highly Filled Polymer Concrete Composites During Curing. "Environment. Technology. Resources." Rezekne, Latvia, Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Conference. 2023. Volume 3, pp 219-225, Print ISSN 1691-5402, Online ISSN 2256-070X.
- [7] Sabi Sabev. Investigation of the Elastic Dynamic Modulus During Hardening of Polymer Concrete Composition. Association Science and Technology Unions and House of Science and Technique - Plovdiv, Bulgaria. Proceedings of the Youth Forums "Science, Technology, Innovation, Business - 2022", 24-25 November 2022, pp 141-144, ISSN 2367 – 8569 (in Bulgarian).
- [8] Angel Lengerov, Kalin Krumov, Georgi Levicharov. Study of the Kinematic and Dynamic of Interaction of a Vibrating System for Cutting Optical Slugs. "Environment. Technology. Resources." Rezekne, Latvia, Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Conference. 2023. Volume 3, pp 149-153, Print ISSN 1691-5402, Online ISSN 2256-070X.
- [9] Georgi Levicharov, Angel Lengerov, Stoyan Paliiski. Study about the Influence of the Process Parameters of Vibro Impact Cutting of Optical Slugs on the Productivity of the Process. "Environment. Technology. Resources." Rezekne, Latvia, Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Conference. 2023. Volume 3, pp 164-167, Print ISSN 1691-5402, Online ISSN 2256-070X.
- [10] Angel Lengerov, Sabi Sabev, Stoyan Paliiski. Experimental Study of Surface Roughness in Vibro-impact Cutting of Optical Slugs. "Environment. Technology. Resources." Rezekne, Latvia, Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Conference. 2023. Volume 3, pp 145-148, Print ISSN 1691-5402, Online ISSN 2256-070X.
- [11] Boyan Dochev. Thermal Analysis of Aluminum-Silicon Alloys AlSi25Cu4Cr and AlSi25Cu5Cr Modified with Different Phosphorus Concentrations. Association Science and Technology Unions and House of Science and Technique - Plovdiv, Bulgaria. Proceedings of the Youth Forums "Science, Technology, Innovation, Business - 2022", 24-25 November 2022, pp 116-122, ISSN 2367 – 8569 (in Bulgarian).
- [12] Boyan Dochev. Investigation of the Influence of T5 and T7 Heat Treatment on the Mechanical Properties of AlSi25Cu4Cr and AlSi25Cu5Cr Alloys. Association Science and Technology Unions and House of Science and Technique - Plovdiv, Bulgaria. Proceedings of the Youth Forums "Science, Technology, Innovation, Business - 2022", 26-27 May 2022, pp 6-10, ISSN 2367 – 8569 (in Bulgarian).
- [13] Desislava Dimova. Investigation of the Effect of Recrystallization Tempering Detail Time on the Structure of Cu 99.9 Parts Made by Spinning. Association Science and Technology Unions and House of Science and Technique - Plovdiv, Bulgaria. Proceedings of the Youth Forums "Science, Technology, Innovation, Business - 2022", 24-25 November 2022, pp 123-127, ISSN 2367 – 8569 (in Bulgarian).
- [14] Kalina Kamarska, Boyan Dochev. Investigation of the Corrosion of Aluminum Alloys AlSi25Cu4Cr and AlSi25Cu5Cr in 3% NaCl. Association Science and Technology Unions and House of Science and Technique - Plovdiv, Bulgaria. Proceedings of the Youth Forums "Science, Technology, Innovation, Business - 2022", 26-27 May 2022, pp 15-20, ISSN 2367 – 8569 (in Bulgarian).
- [15] Kalina Kamarska, Boyan Dochev. Corrosion of Aluminum Alloys AlSi25Cu4Cr AND AlSi25Cu5Cr in Acidic Media. Association Science and Technology Unions and House of Science and Technique - Plovdiv, Bulgaria. Proceedings of the Youth Forums "Science, Technology, Innovation, Business - 2022", 26-27 May 2022, pp 21-26, ISSN 2367 – 8569 (in Bulgarian).



- [16] Boyan Dochev, Ivanka Delova. Investigation of the Mechanical Properties of Hypereutectic Aluminum-Silicon Alloys AlSi25Cu4Cr and AlSi25Cu5Cr with the Use of Specialized Software. Association Science and Technology Unions and House of Science and Technique - Plovdiv, Bulgaria. Proceedings of the Youth Forums "Science, Technology, Innovation, Business - 2022", 26-27 May 2022, pp 11-14, ISSN 2367 – 8569 (in Bulgarian).
- [17] Raycho Raychev, Ivanka Delova. Study of the Behavior of Nonstandard Aluminum-Silicon Alloys AlSi11Cu5Mg and AlSi18Cu5Mg Under Combined Loads. Association Science and Technology Unions and House of Science and Technique - Plovdiv, Bulgaria. Proceedings of the Youth Forums "Science, Technology, Innovation, Business - 2022", 26-27 May 2022, pp 36-39, ISSN 2367 – 8569 (in Bulgarian).
- [18] Raycho Raychev, Desislava Dimova. Software Investigation of the Mechanical Characteristics of AlSi18Cu3CrMn Alloy. Association Science and Technology Unions and House of Science and Technique - Plovdiv, Bulgaria. Proceedings of the Youth Forums "Science, Technology, Innovation, Business - 2022", 26-27 May 2022, pp 27-30, ISSN 2367 – 8569 (in Bulgarian).
- [19] Raycho Raychev, Desislava Dimova. Determination of Crack Resistance of Aluminum-Silicon Alloy Through Specialized Software. Association Science and Technology Unions and House of Science and Technique - Plovdiv, Bulgaria. Proceedings of the Youth Forums "Science, Technology, Innovation, Business - 2022", 26-27 May 2022, pp 31-35, ISSN 2367 – 8569 (in Bulgarian).
- [20] Plamen Kasabov, Desislava Dimova. Investigation of the Effect of Cutting Tool Geometry on the Roughness Class of Alloy ALSI25 in Turning. Association Science and Technology Unions and House of Science and Technique - Plovdiv, Bulgaria. Proceedings of the Youth Forums "Science, Technology, Innovation, Business - 2022", 24-25 November 2022, pp 128-134, ISSN 2367 – 8569 (in Bulgarian).
- [21] Plamen Kasabov, Desislava Dimova. Investigation of the Influence of the Microstructure on the Quality of the Machined Surfaces of Hypereutectic Aluminum-Silicon Alloys During Milling. Association Science and Technology Unions and House of Science and Technique - Plovdiv, Bulgaria. Proceedings of the Youth Forums "Science, Technology, Innovation, Business - 2022", 24-25 November 2022, pp 135-140, ISSN 2367 – 8569 (in Bulgarian).
- [22] Plamen Kasabov, Sabi Sabev. Methodology for Active and Adaptive Control in the Milling Process of a Rectangular Pocket. Association Science and Technology Unions and House of Science and Technique - Plovdiv, Bulgaria. Proceedings of the Youth Forums "Science, Technology, Innovation, Business - 2022", 24-25 November 2022, pp 149-152, ISSN 2367 – 8569 (in Bulgarian).
- [23] Plamen Kasabov, Sabi Sabev. Study of the Stability During Boring of an Internal Rotating Surface on a CNC Lathe. Association Science and Technology Unions and House of Science and Technique - Plovdiv, Bulgaria. Proceedings of the Youth Forums "Science, Technology, Innovation, Business - 2022", 24-25 November 2022, pp 153-157, ISSN 2367 – 8569 (in Bulgarian).
- [24] Sabi Sabev, Plamen Kasabov. Algorithm for Examining the Own Frequencies of Antivibration Boring Bar. Association Science and Technology Unions and House of Science and Technique - Plovdiv, Bulgaria. Proceedings of the Youth Forums "Science, Technology, Innovation, Business - 2022", 26-27 May 2022, pp 40-43, ISSN 2367 – 8569 (in Bulgarian).



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

DISPERSE SYSTEMS AND RHEOLOGY IN CLEAN TECHNOLOGIES – LAB 6.2 CAPABILITIES AND DEVELOPMENTS

Krassimir D. Danov^{1,2*}, Romyana D. Stanimirova^{1*},
Mihail T. Georgiev¹, Krastanka G. Marinova^{1,2}

¹ Centre of Competence “Smart Mechatronics, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies”, 1164 Sofia, Bulgaria

² Department of Chemical and Pharmaceutical Engineering, Faculty of Chemistry and Pharmacy, Sofia University “St. Kliment Ohridski”, Sofia 1164, Bulgaria

*Corresponding author: kd@lcpe.uni-sofia.bg, rs@lcpe.uni-sofia.bg

Abstract

Laboratory 6.2 “Disperse systems and rheology in clean technologies” within WP 6 “Nano-structured materials and disperse systems in clean technologies” aims at the development of new systems for clean technologies and nano-technologies in various scientific and technological areas: new cleaning agents for hard surfaces; encapsulation and controlled release of reagents; wetting and dewetting processes. The main objectives are to conduct experimental and theoretical research and development of new dispersed systems through the inclusion of new raw materials and innovative materials, and to develop and apply theoretical models of the interactions and stability of complex dispersed systems.

High scientific output of Lab 6.2 is manifested via 21 scientific publications in the fields of Dispersion Chemistry, Chemical and Materials Sciences for the period 2018 – 2024 (8 articles in Q1 journals, 6 in Q2, and 7 materials in Q4). Optimized compositions of cleaning formulations for hard surfaces with sulfonated methyl esters have been obtained [1]. New theoretical models for the interactions that determine the structures in micellar systems have been developed and applied [2]. New phenomena such as vortexing [3] and nanoemulsification [4] have been described. New methods have been proposed for obtaining emulsions and foams from triglyceride phases [5]. The role of the components and compositions for the rheology [6], wetting, and cleaning [7] has been demonstrated.

Keywords: disperse systems, rheology, clean technologies, wetting, emulsification, theoretical modeling

1. INTRODUCTION

The volume of scientific research in the field of colloid chemistry, which includes dispersed systems, surface phenomena, nanoparticles and nanomaterials, has grown steadily over the last 30 years: this can be seen from the increasing impact factors of journals in the Nanotechnology and Dispersion Chemistry thematic areas, and is due to the fundamental and applied importance of these fields [8,9].

The areas in which the most intensive research is conducted are:

- Synthesis and analysis of the properties of new micro- and nanostructured materials with new mechanical, thermal insulation, catalytic, optical and magnetic properties.
- Disperse systems in the protection and purification of the environment, such as filtration and absorption systems for water and gas

purification; sensors for detection of pollutants based on nanostructured surfaces.

- Synthesis and characterization of properties of new wetting and cleaning preparations based on micellar and polymer solutions, with applications in clean technologies, and specific to the surfaces to be cleaned and the type of pollutants.

Laboratory 6.2 “Disperse systems and rheology in clean technologies” within WP 6 “Nano-structured materials and disperse systems in clean technologies” focuses on the development of new dispersed systems for clean technologies and nanotechnologies in the following areas:

- Stabilization of industrial products representing dispersed systems.
- New cleaning agents for hard surfaces with technological applications.
- Methods for encapsulation and controlled release of reagents in technological processes.
- Optimization of wetting and dewetting processes in technological applications.

The main objectives are experimental and theoretical research and development of new dispersed systems through:

- Inclusion of new raw materials and innovative materials;
- Development and application of theoretical models for the interactions and stability of complex dispersed systems;
- Characterization and optimization of dispersed systems with technological application.

Working closely with Laboratory 6.1. “Innovative nanostructured materials” and establishing cooperation with the other laboratories within the Center of Competence, and with Bulgarian and foreign industrial companies, will provide a stable basis for future development.

The present material aims to demonstrate the achievements and the capabilities of La-

boratory 6.2 “Disperse systems and rheology in clean technologies”.

2. OPTICAL INSTRUMENTATION FOR SURFACE AND BULK CHARACTERIZATION

Optical attachment (Fig. 1) integrated with the rheometer enables in-situ, frame-synchronized imaging under shear/oscillation, capturing droplet/bubble deformation, coalescence/breakup, alignment, and shear banding. It supports transmitted/epi illumination, optional crossed polarizers for birefringence, and PIV analysis, and works with temperature-controlled plate-plate or cone-plate geometries without compromising gap or normal-force control.

An imaging ellipsometer (EP4, Accurion GmbH, Göttingen) equipped with a focus scanner (Fig. 2) provides quantitative, per-pixel ψ/Δ mapping and model-based retrieval of the film thickness and the optical constants. The system: a) achieves $\sim 1\ \mu\text{m}$ lateral resolution (optical-microscopy class, [10,11]) with Å-scale thickness accuracy on solid films; b) supports single- or multi-wavelength operation in the visible/near-IR (350-1000 nm); c) allows angle-of-incidence tuning (typically $40\text{--}75^\circ$) for optimum sensitivity.



Fig. 1. Optical attachment mounted on a TA Instruments rheometer, enabling in-situ imaging during shear and oscillatory tests on a temperature-controlled plate-plate geometry

Interchangeable objectives (2×, 10×, 50×) enable field-of-view versus resolution trade-offs. Automated focus-stacking preserves sharpness on uneven substrates and permits stitched maps over mm–cm areas; time-resolved acquisition tracks adsorption, swelling, and crosslinking kinetics with second-level temporal resolution. Measurements are calibrated on Si/SiO₂ standards and fitted with Cauchy models to extract the thickness (d), the complex refractive index (n , k), and the surface coverage.

The instrument supports both null ellipsometry and rotating-compensator ellipsometry (RCE) modes. A wet (liquid) cell enables in-situ thickness measurements of layers under water, and the EP4 can be coupled to a Langmuir trough to quantify the monolayer thickness at the air/water interface. A mapping mode resolves nanometric variations in thickness/optical contrast across large areas, providing roughness/topography proxies with a high spatial uniformity. In our laboratory, we have extended the interpretation pipeline with additional analyses and custom visualization routines, improving confidence in fitted parameters and facilitating correlative studies.

Representative data (Fig. 3) show a silicone surface after drying a cationic surfactant layer, with thickness/contrast heterogeneity consistent with interfacial layer structuring [12].



Fig. 2. Imaging ellipsometer EP4 (Accurion, Germany) used for per-pixel ψ/Δ mapping and thin-film thickness retrieval

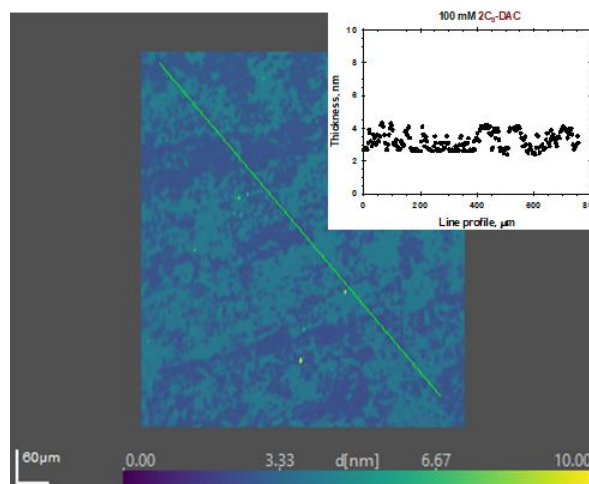


Fig. 3. Images of dry layers deposited from solutions of 100 mM 2C8-DAC obtained by the ellipsometer EP4 (Fig.2). The vertical sectional analysis is shown as an inset

3. EQUILIBRIUM AND DYNAMIC SURFACE PROPERTIES, SOLID WETTABILITY AND LIQUID FOAMABILITY

Drop Shape Analysis System DSA100E (Krüss GmbH, Germany) for surface wetting studies with a tilting table, a dosing system, a temperature control cell, and a surface rheology module is shown on Fig. 4. The system is designed for determining contact angles, surface energy and wetting of micron drops on solid surfaces, incl. inclined surfaces and under different temperatures. Additional module for characterizing of foam properties of dispersed systems extends further the capabilities of the system.

The liquid deposition or the detachment from solid surfaces have been characterized [13] to optimize the composition of different products (see Fig. 5).



Fig. 4. Drop Shape Analysis System DSA100E (Krüss GmbH, Germany) for surface wetting studies with a tilting table, a dosing system, a temperature control cell, a surface rheology, and a foaming module

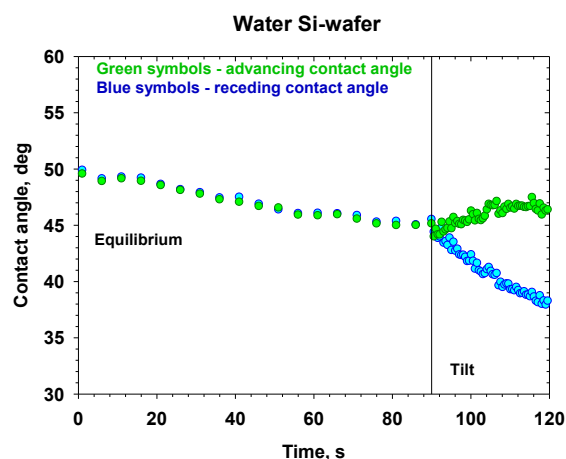


Fig. 6. Contact angle of 3 μ l water droplet on a silicon substrate as a function of time after deposition: 90 second on a horizontal substrate position and 30 seconds during tilting to a vertical position [12]

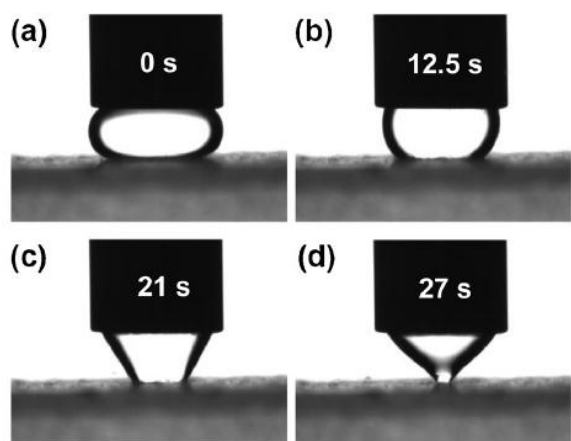


Fig. 5. Consecutive stages of silicone drop detachment from a model surface [13]

The advancing and receding contact angles have been measured, Fig. 6, and analyzed to show the impact of different surfactants on the wettability and to relate the observed effects to the structure of the deposited layers [12].

4. PARTICLE SIZE DISTRIBUTION IN THE DISPERSE SYSTEMS

Laser diffraction system Analysette 22 NanoTec (Fritsch GmbH, Germany) is shown on Fig. 7. The system allows for the measurement and analysis of the particle size and the size distribution in various dispersed systems – suspensions, emulsions, aerosols. Thus, monodisperse nanoemulsions spontaneously formed from multiconnected micellar phases [4] in the presence of different essential oils have been characterized, see Fig. 8.



Fig. 7. Laser Diffraction System Analysette 22 NanoTec (Fritsch GmbH, Germany)

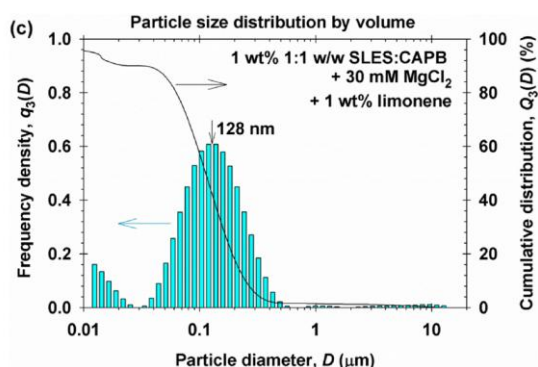


Fig. 8. Size distribution of the obtained limonene droplets in 1 wt% w/w CAPB:SLES solution +30 mM $MgCl_2$ [4]

5. PERSPECTIVES

Innovative products with new raw materials for cleaning and antibacterial effects will be among the main targets of Lab 6.2 in the next period. Other targets include: the optimization of surface wetting for process applications; developing theoretical models and experimental approaches for encapsulation and controlled release of reactants in technological processes. Main goal in the project BG16RFPR002-1.014-0005, is to achieve TRL4, i.e. component and/or breadboard laboratory validation of a technology, where basic technological components are integrated and tested in a laboratory setting to demonstrate that they work together.

The staff of Laboratory 6.2 has published four scientific articles in 2025 so far, including three articles in Q1 journals and one in Q2 [14-17]. Mass-transfer processes with important technological applications have been studied both experimentally and theoretically: spontaneous bubble growth in high-air-solubility liquids and emulsion droplets (see Fig. 9 and Ref. [14]), and volatile amphiphiles between vapor and aqueous phases (see Fig. 10 and Ref. [15]). Polymers bulk conformation and deposition on different surfaces, e.g. hair [16] and silicon [16,17] has been

thoroughly investigated and described. Representative images of polymer-silicone layers deposited on Hair-like surfaces [16] are shown on Fig. 11. The results obtained in 2025 has been presented to two international conferences so far, with 1 oral presentation and 3 posters.

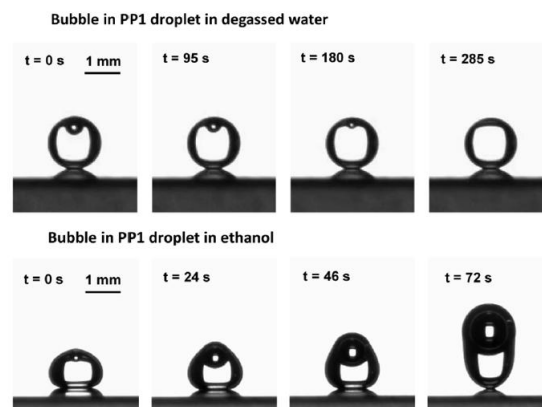


Fig. 9. Bubbles inside PP1 droplet in degassed water (upper row) and in ethanol (second row) [14]. The observations were performed with instrument DSA100E, see Fig. 4

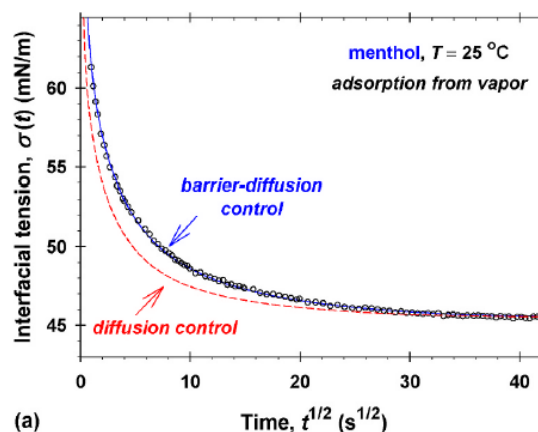


Fig. 10. Relaxation of the interfacial tension, $\sigma(t)$, in the course of adsorption from menthol vapors: symbols – experimental data; dashed lines – diffusion-controlled model (no adjustable parameters); solid lines – the best theoretical fits using the mixed barrier-diffusion-controlled model [15]

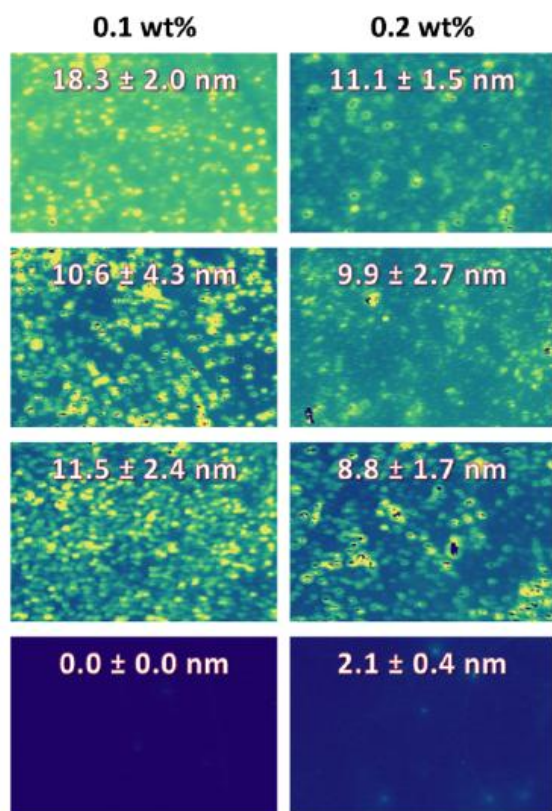


Fig. 11. Ellipsometry images ($1470 \mu\text{m} \times 2160 \mu\text{m}$) of lubricant (PSCs and silicone) layers deposited on Hair-like surfaces. The average thickness and reproducibility are shown at the top of each image [16]. The observations and measurements were performed with the imaging ellipsometer EP4, see Fig. 2

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was funded by the European Regional Development Fund under the Operational Program “Scientific Research, Innovation and Digitization for Smart Transformation 2021-2027”, Project CoC “Smart Mechatronics, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies”, BG16RFPR002-1.014-0005.

REFERENCES

- [1] Danov K., Stanimirova R., Kralchevsky P., Slavova T., Yavrukova V., Ung Y., Tan E., Xu H., Petkov J. Solubility of ionic surfactants below their Krafft point in mixed micellar solutions: Phase diagrams for methyl ester sulfonates and nonionic cosurfactants. *Journal of Colloid and Interface Science* 601 (2021) 474–485
- [2] Danov K., Kralchevsky P., Stanimirova R., Stoyanov S., Cook J., Stott I. Analytical modeling of micelle growth. 4. Molecular thermodynamics of wormlike micelles from ionic surfactants: theory vs. experiment. *Journal of Colloid and Interface Science* 584 (2021) 561–581
- [3] Basheva E., Danov K., Radulova G., Kralchevsky P., Xu H., Ung Y., Petkov J. Properties of the micelles of sulfonated methyl esters determined from the step wise thinning of foam films and by rheological measurements. *Journal of Colloid and Interface Science* 538 (2019) 660–667
- [4] Georgiev M., Aleksova L., Kralchevsky P., Danov K. Phase separation of saturated micellar network and its potential applications for nanoemulsification. *Colloids and Surfaces A* 607 (2020) 125487
- [5] Cholakova D., Glushkova D., Tcholakova S., Denkov N. Cold-burst method for nanoparticle formation with natural triglyceride oils. *Langmuir* 37 (2021) 7875–7889
- [6] Stancheva T., Georgiev M., Radulova G., Danov K., Marinova K. Rheology of saturated micellar networks: wormlike micellar solutions vs. bicontinuous micellar phases. *Colloids and Surfaces A* 652 (2022) 129927
- [7] Yavrukova V., Shandurkov D., Marinova K., Kralchevsky P., Ung Y., Petkov J. Cleaning ability of mixed solutions of sulfonated fatty acid methyl esters. *Journal of Surfactants and Detergents* 23 (2020) 617–627
- [8] https://scholar.google.com/citations?view_op=top_venues&hl=en&vq=chm_nanotechnology
- [9] https://scholar.google.com/citations?view_op=top_venues&hl=en&vq=chm_dispersionchemistry



- [10] <https://accurion.parksystems.com/thin-film-characterization/products/nanofilm-ep4>
- [11] Georgiev M., Konstantinov B., Marinova K., Petkov J., Danov K. Investigation of cationic surfactants adsorption on silicon wafers using imaging ellipsometry. J. Technical Univ. Gabrovo 66 (2023) 38–42
- [12] Yavrukova V., Kovacheva D., Marinova K., Danov K., Petkov J. Wettability and morphology of cationic surfactant layers in the presence of nonionic surfactants on solid surfaces. Proc. Int. Sci. Conf. „Mechatronics, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies“, 2024, Plovdiv, p. 103.
- [13] Stanimirova R., Kralchevsky P., Danov K., Xu H., Ung Y., Petkov J. Oil drop deposition on solid surfaces in mixed polymer-surfactant solutions in relation to hair- and skin-care applications. Colloids and Surfaces A 577 (2019) 53–61
- [14] Vakarelski I.U., Marinova K.G., Danov K.D. Spontaneous bubble growth inside high-saturation-vapor-pressure and high-air-solubility liquids and emulsion droplets. Langmuir 41 (2025) 2071–2081
- [15] Uzunova R., Danov K., Stanimirova R., Gurkov T. Quantitative characterization of the mass transfer of volatile amphiphiles between vapor and aqueous phases: Experiment vs theory. JCIS Open 18 (2025) 100133
- [16] Dimitrova N., Georgiev M., Anachkov S. Optimizing lubricant deposition on hair-like substrates using cationic polymer/anionic surfactant complexes. Langmuir 41 (2025) 17494–17504
- [17] Georgiev M., Simeonova S., Konstantinov B., Danov K., Riley R., Woodall D. Conformational and rheological behavior of kappa carrageenan in glycerol: Effects of sodium salts and preparation temperature. Carbohydrate Polymers 368 (2025) 124095.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ТЕХНОЛОГИЧНИ ВЪЗМОЖНОСТИ НА ОБОРУДВАНЕТО В ЛАБОРАТОРИЯ С 1.3. „АДИТИВНИ И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ ТЕХНОЛОГИИ И ЕКИПИРОВКА“

TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF THE EQUIPMENT IN THE LABORATORY C 1.3. “ADDITIVE AND ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT”

Hristian Mitev

TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO

*Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"
(CCSMEESSST)*

Yosif Mitev

*TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO
CCSMEESSST*

Hristo Radev

*TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO
CCSMEESSST*

Hristo Metev

*TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO
CCSMEESSST*

Irina Aleksandrova

*TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO
CCSMEESSST*

Abstract

The main advantage of the additive method is flexibility - the same machine can produce many fundamentally different products without the need for special equipment for them.

The report presents modern trends in the development of additive technologies, the technological capabilities of the equipment implemented in the laboratory. C 1.3. "Additive and energy-saving technologies and equipment", as well as the results achieved by the team in the field of additive and tool manufacturing.

Keywords: 3D metal printer; additive technologies; metal powder.

ВЪВЕДЕНИЕ

Новите прахообразни метали откриват нови възможности, които ще доведат до увеличаване на приложенията на метални прахове през следващите години. „Research and Markets“ публикува нов доклад, озаглавен „Възможности за адитивно производство в индустрията за метални прахове: 10-годишна пазарна прогноза“. Докладът

предполага, че новите приложения в аерокосмическата, нефтената и газовата, медицинската и стоматологичната промишленост ще увеличат експоненциално търсенето на прахови метални материали [1].

Осреднените прогнози за развитието на пазара на адитивни технологии (3D принтиране) на някои от водещите анализаторски компании показват ръст от 4,1 млрд.

232

долара през 2014 г. до 44,5 млрд. през 2026 г. [2].

Поради ниската скорост и високата цена на производство в сравнение с конвенционалните процеси за изработване на метални изделия, адитивното производство се прилага при единично производство или производство на малки партии. Адитивното производство на матрици и инструменти, които се прилагат за формоване на метали и полимерни материали намира широко приложение поради възможностите за постигане на уникални характеристики на матрицата, като например многопосочни охлаждащи канали. Тези характеристики позволяват технологичният процес на формоване на метали да бъде по-ефективен или да се произведе продукт с по-високо качество.

В доклада са представени възможностите на оборудването за адитивно производство в лаборатория С 1.3. „Адитивни и енергоспестяващи технологии и екипировка“ в Габрово Тех Парк.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Научните задачи на лабораторията С 1.3. „Адитивни и енергоспестяващи технологии и екипировка“ са:

- проектиране, оптимизиране и производство на детайли и инструменти по метода на 3D принтиране;
- проектиране на процеси за доизграждане на детайли и инструменти по метода на 3D принтиране;
- проектиране и изследване на конвенционални и специални инструменти, включително и на сглобяеми инструменти с елементи, получени по метода на 3D принтиране;
- оптимизиране на условията и режимите за изграждане на детайли по метода на 3D принтиране;
- проектиране и изследване на работоспособността на специални инструменти,

получени по метода на 3D принтиране, предназначени за обработване на неметални материали.

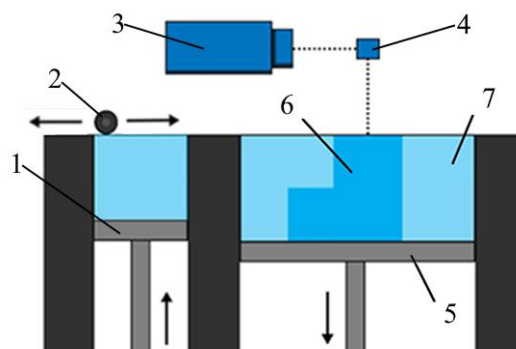
За тяхното реализиране лабораторията е оборудвана с 3D принтер за метални изделия ProX DMP 200.

На фиг. 1 е представен разположението в лабораторията 3D принтер за метални изделия ProX DMP 200.



Фиг. 1. 3D принтер за метални изделия ProX DMP 200

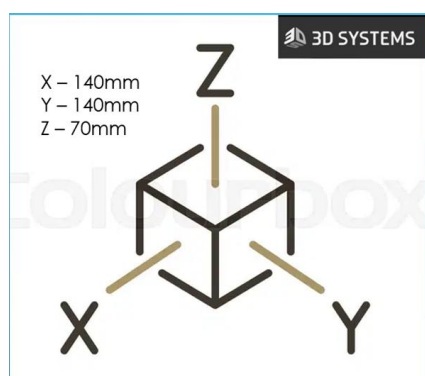
Технологията, с която се осъществява изграждането на детайлите е „Metal Powder Bed Technology“. На фиг. 2 е представена принципната схема на процеса по изграждане на детайли по тази технология.



Фиг. 2. Принципна схема на „Metal Powder Bed Technology“ [3]

Системата за подаване на металния прах (1) се състои от бутало, което подава необходимото количество прах към системата за разстилане на металния слой (2). Тя се състои от прецизна ролка, която едновременно разстила металния прах на слой с точна височина. Тази височина варира от 0.01 mm до 0.05 mm, в зависимост от зададените режими на изграждане. Прецизно положеният метален слой се синтерова чрез лазерно лъчение, осигурено от мощен лазерен източник (3). За да бъде осигурено точното обхождане на конкретните контури, разположени в текущия слой от изграждания детайл, се използва прецизна система за отклонение на лазерния лъч (4). След приключване на процеса на синтероване на текущия слой, прецизна електромеханична система премества плочата (5), върху която се изгражда металното изделие (6) надолу на разстояние, равно на височината на изграждания слой, като процесът започва отначало. В т. нар. „прахово легло“ (7) се депозира металният прах, използван при послойното изграждане, като той е напълно годен за повторно използване [3].

Размерите на работната зона на 3D принтера за метални изделия ProX DMP 200 са 140x140x70 mm, като ориентацията на работната зона в пространството е представена на фиг. 3.



Фиг. 3. Работна зона на ProX DMP200 [4]

Материалите, от които могат да бъдат изработвани детайли от 3D принтера за метални изделия ProX DMP 200, са:

- стомана 1.2907 – LaserForm Maraging Steel (B);
- стомана 17-4PH – LaserForm 17-4 PH (B);
- стомана 316L – LaserForm 316L (B);
- стомана ASTM F75 – Laser Form CoCr (B).

Химичният състав на стоманите е представен в табл. 1 [4].

Таблица 1. Химичен състав на използваните стомани.

Елемент	Процентно съдържание			
	Стомана 1.2907	Стомана 17-4PH	Стомана 316L	Стомана ASTM F75
Fe	Бал.	Бал.	-	≤0.5
Ni	17.0-19.0	3 - 5	10.0-14.0	≤0.1
Co	9.0-11.0	-	-	Бал.
Mo	4.0-6.0	-	2.0-3.0	5.0-6.0
Ti	0.90-1.10	-	-	-
Si	≤1.0	≤1.0	≤1.0	≤1.0
Cr	-	15 - 17.5	16.5-18.0	28.0-30.0
Cu	-	3 - 5	-	-
Mn	-	≤1.0	≤2.0	≤1.0
Nb	-	0.15 - 0.45	-	-
C	-	-	≤0.030	≤0.02
S	-	-	≤0.030	-
P	-	--	≤0.045	-
Cd	-	-	-	≤0.02
Be	-	-	-	≤0.02
Pb	-	-	-	≤0.02

Стомана 1.2907 лесно се поддава на термична обработка чрез прост процес на закаляване чрез стареене, което води до отлична твърдост и якост. Стоманата има добра изнosoустойчивост. По отношение на последващата обработка, материалът показва добра заваряемост и обработваемост. Стомана 1.2709 е идеална за иновативни проекти на инструменти и матрици, включително конформни охлаждащи канали за шприцване, леене под налягане и екструдирание. Материалът се използва и за високопроизводителни аерокосмически, автомобилни и други промишлени прило-



жения, които изискват висока якост и износоустойчивост [4].

Неръждаемата стомана тип 17-4 PH е най-широко използваната от всички дисперсионно-втвърдяващи се неръждаеми стомани. Нейната комбинация от свойства дава на конструкторите възможности да осигурят надеждност към своите продукти, като същевременно опростяват производството и често намаляват разходите. Стомана 17-4 PH е мартензитна неръждаема стомана, която осигурява изключителна комбинация от висока якост, добра устойчивост на корозия и добри механични свойства при температури до 316°C. Нейната уникална комбинация от свойства прави тази сплав ефективно решение за много конструктивни и производствени проблеми [4].

Аустенитната неръждаема стомана тип LaserForm 316L е изключително нисковъглеродният клас на 316. Тази стомана се използва като материал за общо предназначение с отлични механични и корозионни свойства при стайна температура. Устойчивостта ѝ на хлориди прави този специфичен клас неръждаема стомана подходящ за морски приложения. 316L е и предпочитаният материал за използване във водородни атмосфери или за водородни тръбопроводи / охлаждащи приложения. Освен това 316L запазва добри механични свойства при минусови и дори криогенни температури и е подходяща за структурни компоненти при ниски температурни приложения. Ненадмината е и степента и на приложение в хранително – вкусовата промишленост [4].

Кобалтово-хром-молибденовите сплави са известни с високата си якост и твърдост и запазват тези свойства дори при повишени температури. Освен това, те спонтанно образуват защитен пасивен филм, който прави LaserForm CoCr (B) едновременно устойчив на корозия и биосъвместим. Тези

предимства правят LaserForm CoCr (B) идеалния материал за зъбни коронки, мостове и подвижни частични протези (RPD), за медицински инструменти и устройства, форми и щанци, промишлени приложения, приложения с високо износване и части, изискващи висока якост при повишени температури [4].

От екипа на лабораторията са постигнати следните резултати в областта на адитивното производство:

- проектиран е и е произведен нов формообразуващ комбиниран инструмент „Сърце-дюза“ с темперираща система от вътрешни охлаждателни канали, като е намалена възможността за поява на всмукнатини и други дефекти на изработените пластмасови изделия и е увеличена производителността с 40% в резултат на съкращения технологичен цикъл;
- проектирани са и са произведени дюзи за горивен процес с уникална геометрия;
- проектирани са тяло на сглобяем стругарски нож и тяло на дискова сглобяема фреза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изискванията към изделията, проектирани и изработвани в съвременното машиностроене, са все по-високи [5-7]. Интегрирането на адитивни процеси и технологии в инструменталното производство води до значително повишаване на производителността, качеството и добавената стойност на готовите изделия.

Функционалните възможности на технологичното оборудване в Лаборатория С 1.3. “Адитивни и енергоспестяващи технологии и екипировка” отговарят на предизвикателствата на съвременното машиностроене и Индустрия 4.0.

Наличното оборудване и натрупаният опит при проектиране и изработване на изделия в лабораторията създават условия за повишаване на ефективността при про-



изводство и доизграждане на детайли и инструменти по метода на 3D принтиране, както и за оптимизиране на условията и режимите за тяхното производство.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Системи за проектиране. Digitalk Report, юни 2022 г., <https://digitalk.bg/report/6090/>
- [2] New report: 3D printing opportunities in the metal powder industry, Metal Powder Report 2015; 70(1):40.
- [3] Fabricación aditiva e impresión 3D en la Industria 4.0, UNIDAD 3, http://creo.sc-celje.si/pluginfile.php/2426/mod_resource/content/2/UNIT%203%20-%20AM%20and%203D%20print%20in%20Industry%204.0.pdf (достъпно на 16.09. 2025 г.)
- [4] <https://www.3dsystems.com/> (достъпен на 16.09.2025 г.)
- [5] Gibson I, Rosen D, Stucker B, Khorasani M. Additive Manufacturing Technologies. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2021.
- [6] Lee J-Y, An J, Chua Ch. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. Applied Materials Today 2017; 7: 120–133.
- [7] Kami A, Abedini V, Jadali A. Application of Additive Manufacturing Methods in the Fabrication of Cutting Tools. Contrib. Sci. & Tech Eng, 2024; 1(2): 44-47.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ПРИЛОЖЕНИЕ НА АДИТИВНИТЕ МЕТОДИ В ИНСТРУМЕНТАЛНОТО ПРОИЗВОДСТВО

APPLICATION OF ADDITIVE METHODS IN TOOL MANUFACTURING

Hristian Mitev

TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO

*Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"
(CCSMEESSST)*

Yosif Mitev

TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO
CCSMEESSST

Hristo Radev

TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO
CCSMEESSST

Hristo Metev

TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO
CCSMEESSST

Irina Aleksandrova

TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO
CCSMEESSST

Abstract

The report examines and analyzes the possibilities for manufacturing cutting tools using additive methods. It presents specific solutions for a turning tool and a disc milling cutter with replaceable carbide inserts, created in the "Additive and Energy-Saving Technologies and Equipment" laboratory at the Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies" in Gabrovo.

Keywords: additive technologies; cutting tools; turning tools; disc milling cutters.

ВЪВЕДЕНИЕ

Аддитивното производство (АП), известно още като бързо прототипиране (RP) или 3D принтиране, е група от съвременни производствени процеси за изработване на геометрично сложни обекти от 3D CAD данни с малки или без необходимост от довършващи операции. То намира все по-широко приложение в различни сектори на производството като металообработване, медицина, автомобилна, авиационна, хранително-вкусовата промишленост и др.[1-3].

Днес адитивното производство все повече замества конвенционалните производствени процеси, особено механичната обработка, инжекционното формоване, леенето, заваряването, лазерната и плазмената обработка и др. [1-3].

В инструменталната промишленост адитивните методи се използват за прототипиране и производство на инструменти, като допълват конвенционалните производствени технологии поради множеството предимства, които притежават – съкра-



щаване на цикъла на проектиране и производство без ограничение на конфигурацията и др. [4].

Наличието на подходяща и достъпна инструментална екипировка е определящо при реализирането на всеки технологичен процес. В редица случаи, при специфични детайли, експериментални изследвания, оптимизационни задачи и др. е необходима специална екипировка. Изработването на единични бройки от такава екипировка е бавен и скъп процес, който може да провали изпълнението на задачата. Подходящ подход за решаването на проблема в този случай е методът на 3D принтирането.

Въпреки че 3D принтирането не е по-производително от конвенционалната технология, то съкращава значително производствения цикъл, тъй като конвенционално изработваните инструменти изискват множество операции (струговане, фрезование, шлифование и др.). Последващите обработки на 3D произведените режещи инструменти обикновено се ограничават до запояване на режещите елементи в тялото на инструмента и довършващи операции (често срещани както при адитивно, така и конвенционалното производство) [2].

Изследванията в областта на адитивното производство на режещи инструменти на този етап са насочени основно към: създаване на инструменти със сложна конфигурация, непостижима чрез конвенционалните методи, и с канали с оптимална геометрия за смазочно-охлаждаща течност, осигуряваща по-ефективно охлаждане и смазване на контактната зона [2, 4 5, 6, 7]; изработване на хибридни инструменти, при които опашката се произвежда по конвенционалните технологии, а режещата част – адитивно [8, 9]; изработване на олекотени (решетъчни или тип „пчелна пита“) конструкции инструменти, с което се подобрява динамиката на процеса рязане, абсорбират се вибрациите и се увеличава

трайността на инструмента [6, 8, 10]; създаване на инструменти с висока якост, размерна и геометрична точност чрез използване на материали на метална, полимерна и керамична основа [1, 6]; увеличаване на броя на режещите ръбове при многоръбовите инструменти и оптимизиране на геометрията им, както и на формата и разположението на каналите, осигуряващи прецизно подаване на охлаждаща течност към всеки режещ ръб, позволяващо високопроизводително рязане и повишаване на ефективността на процеса [6, 17]; получаване на нови карбидни (напр. подсилени с диамант) и многослойни структури (сплав от Co-Cr-W) за производството на усъвършенствани конструкции инструменти, изискващи висока топлоустойчивост при обработване на труднообработваеми материали [12, 13].

Както всеки производствен процес и адитивното производство има недостатъци отнасящи се до: ограничения свързани с видовете използвани материали; производствения капацитет; качеството на получаваните повърхнини; необходимост от операции за последваща обработка; повисоки разходи, енергоемкост и времеемкост спрямо конвенционалните технологии [14, 15].

Целта на доклада е анализ на технологичните възможности и приложението на адитивните методи в инструменталното производство с оглед създаване на нови и усъвършенствани конструкции на режещи инструменти.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Производители на режещи инструменти, като Komet Group, MAPAL Inc., Sandvik Coromant и др., използват адитивните методи за производство на режещи инструменти (фрези, стругарски ножове, свредла и др.) [2, 4, 8].

Komet Group са създали фрези по метода на 3D принтирането с вътрешни охлаждащи канали и оптимизирани режещи ръбове и съединителна част. Конструкцията е олекотена, като инструментът работи с по-високи скорости на рязане в сравнение с конвенционалните инструменти, като нивата на шум са по-ниски (фиг.1) [8].



Фиг. 1. Адитивно произведен фрезен инструмент на Komet Group [8]

Sandvik Coromant прилага адитивна технология за изработване на инструменти CoroMill® 390 с вътрешна структура, тип „пчелна пита“ и оптимизирани охлаждащи канали (фиг. 2) [4]. Корпусът на инструментите е произведен чрез 3D принтиране по метода Powder Bed Fusion (PBF) и е изработен от титан. Тази конструкция позволява по-високи скорости на рязане спрямо конвенционално изработените инструменти.



Фиг. 2. Адитивно произведена фреза CoroMill® 390 на Sandvik Coromant [4]

Проектираният и изработен фрезен инструмент, показан на фиг.3, е с вътрешни охлаждащи канали, кухо сменяемо тяло и

голям брой зъби ($z=12$), значително надвишаващ броя на зъбите на конвенционално произвежданите инструменти с подобни размери [2]. Всеки зъб има легло за запоена режеща пластина от поликристален диамант (PCD).



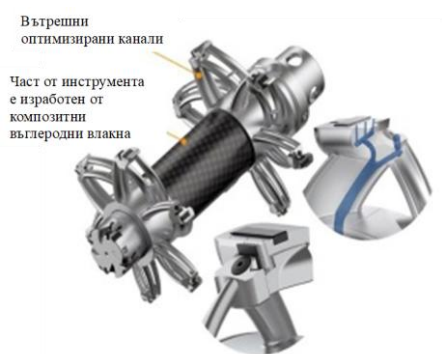
Фиг. 3. Адитивно изработено тяло на фрезен инструмент, монтирано върху държач [2]

MAPAL са разработили свредла със сменяема твърдосплавна режеща част произведена по адитивен метод, и опашка, изработена с конвенционални методи (фиг. 4) [8]. Тези инструменти се характеризират с оптимално образуване и отвеждане на стружките, подобрен поток на охлаждаща течност и намаляване на разходите за изработване.



Фиг. 4. Адитивно произведено свредло със сменяема пластина на MAPAL [8]

Използването на адитивни технологии за производството на инструменти за статори на електрически превозни средства е намалило значително теглото им. Това е постигнато с конструктивна оптимизация, запълване тип „пчелна пита“ и оптимално охлаждане (фиг. 5) [4].



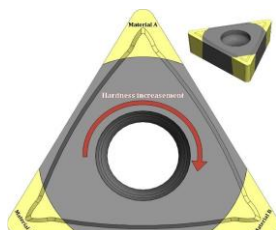
Фиг. 5. Инструмент за пробиване на статори на електрически превозни средства [4]

Адитивно произведен инструмент от WC-Co за нарязване на вътрешни зъби на зъбни козела, изработен по SLM технология, е показан на фиг. 6 [4].



Фиг. 6. Адитивно произведен инструмент за нарязване на зъбни козела с вътрешни зъби [4]

С техниката на насочено енергийно отлагане (DED) са изработени сменяеми пластини с три различни нива на твърдост, подходящи за обработване на различни материали (фиг. 7). Режещите ръбове на пластините са със запоени синтетични диаманти [4].



Фиг. 7. Концептуален дизайн на адитивно произведена сменяема пластина [4]

Примерна олекотена конструкция на 3D-принтиран метчик на фирма Thurmer е показана на фиг. 8 [8]. 3D принтирането на резбонарезни инструменти е на етап прототипиране.



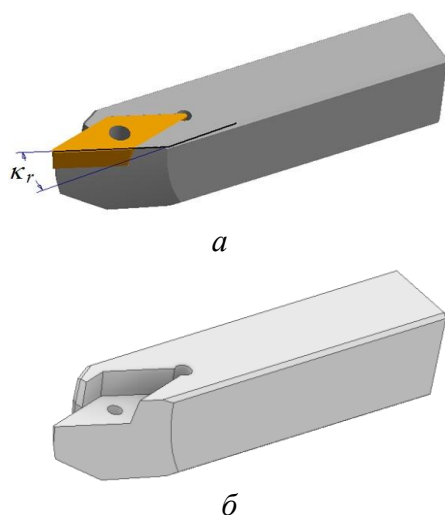
Фиг. 8. Адитивно произведен метчик с 90% намаление на масата [8]

Като се отчита натрупаният опит при проектиране и производство на режещи инструменти по адитивни методи, в лаборатория „Адитивни и енергоспестяващи технологии и оборудване“ към Центъра за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии" – Габрово са проектирани и изработени три вида режещи инструменти – метчик; стругарски нож със сменяема твърдосплавна пластина и дискова фреза със сменяеми твърдосплавни пластини.

На пръв поглед съществува голямо разнообразие от универсални стругарски ножове със сменяеми твърдосплавни пластини, предлагани от множество фирми. Но то се свежда до различен тип пластина, различен заден ъгъл и различен главен установъчен ъгъл. В много случаи е необходимо да се работи с други, различни от стандартните параметри (напр. наклон на главния режещ ръб, главен установъчен ъгъл и др.). Такава нестандартна инструментална екипировка се изработва бавно, а разходите в повечето случаи са неоправдани. Прилаганите решения от бързорезеща стомана или монолитни твърдосплавни

инструменти предполагат по-ниска производителност и качество поради необходимостта от често презаточване за поддържане на работоспособността им.

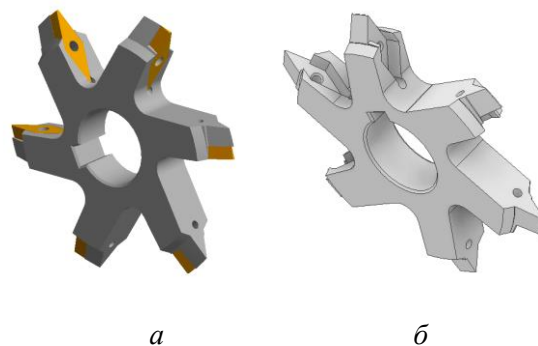
Разработен е параметричен модел на нож със сменяема твърдосплавна пластина, предназначен за изработване на трапецовидна резба (фиг. 9). Използвана е пластина VCMТ110304, като леглото се получава директно при принтирането на тялото. Геометричните параметри са: главен установъчен ъгъл $\kappa_r = 20^\circ$; ъгъл на наклона на главния режещ ръб $\lambda_s = 0^\circ$; главен заден ъгъл $\alpha_0 = 7^\circ$. Този подход позволява принтирането на тялото в различни варианти според конкретната необходимост при оптимизационни изследвания и др.



Фиг. 9 Модели на сглобен стругарски нож (а) и на тялото на ножа (б)

Аналогичен подход е използван при изработването на дискова фреза със сменяеми твърдосплавни пластини (фиг. 10). Фрезата е предназначена за експерименти, свързани със зъбонарязване, налагащи редица специфични геометрични изисквания. Тя е проектирана на база на твърдосплавна пластина VCMТ110304 с ъгъл при върха 35° , което е определящо при формиране на режещ зъб с 40° , съставен от две пластини.

Така проектираната фреза може да се използва за обработването на специални “V” образни канали, зъбни гребени и зъбни колела с прави или наклонени зъби.



Фиг. 10 Модели на дискова фреза със сменяеми твърдосплавни пластини (а) и на тялото на фрезата (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализът на разгледаните и други описани в литературата примери на адитивно изработени инструменти показва, че тези методи предлагат значителни предимства по отношение на намаляване на теглото, оптимизиране на охлаждащите канали и на геометрията на инструмента, подобряване на параметрите на обработка, гъвкавост при избора на инструментален материал и повишаване на производителността.

2. Направеното проучване показва, че засега липсва изчерпателен преглед на приложението на адитивните процеси при изработване на режещи инструменти. Те все още не са намерили широко приложение, като се използват предимно за изработване на прототипи или демонстрационни инструменти. Причините за това са в липсата на разбиране за възможностите и предимствата на тези технологии, както и скъпоструващото производство.

3. Направеният обобщен анализ подчертава необходимостта от по-нататъшни изследвания в тази област, особено по отно-



шение на експериментални тестове на адитивно разработени режещи инструменти.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kelliger T, Meurer M, Bergs T. Potentials of Additive Manufacturing for Cutting Tools: A Review of Scientific and Industrial Applications. *Metals* 2024; 14(982): 1-28.
- [2] Matos F, Coelho H, Emadinia O, Amaral R, Silva T, Goncalves N, Marouvo J, Figueiredo D, Jesus A, Reis A. Additively manufactured milling tools for enhanced efficiency in cutting applications. *Procedia Structural Integrity* 2024; 53: 270–277.
- [3] Gibson I, Rosen D, Stucker B, Khorasani M. *Additive Manufacturing Technologies*. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG; 2021.
- [4] Kami A, Abedini V, Jadali A. Application of Additive Manufacturing Methods in the Fabrication of Cutting Tools. *Contrib. Sci. & Tech Eng*, 2024; 1(2): 44-47.
- [5] Lakner T, Bergs T, Döbbeler B. Additively manufactured milling tool with focused cutting fluid supply. *Procedia CIRP* 2019; 81: 464–469.
- [6] Skrzyniarz M, Nowakowski L, Blasiak S. Geometry, Structure and Surface Quality of a Maraging Steel Milling Cutter Printed by Direct Metal Laser Melting. *Materials* 2022; 15(773): 1-14.
- [7] Costa IB, Cunha BR, Marouvo J, Figueiredo D, Bruno Miguel Guimaraes BM, Vieira MF, Costa JM. Topology Optimization of a Milling Cutter Head for Additive Manufacturing Metals 2025; 15(729): 1-14.
- [8] Niini A. Additive manufacturing of thread cutting tool. 2019. Master's Thesis. LUT University.
- [9] Anuj SSS, Muralidharan B. Review on 3D printing techniques for cutting tools with cooling channels. *Heliyon* 2023; 9(e22557): 1-13.
- [10] Hanzl P, Zetková I. Benefits of a New Approach to Designing Milling Cutter Using Metal Additive Manufacturing. *Manuf. Technol* 2019; 19: 385–390.
- [11] Satish Prakash K, Nancharaih T, Subba Rao VV. Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing - An Overview. *Materials Today: Proceedings* 2018; 5: 3873–3882.
- [12] Traxel K, Bandyopadhyay A. Diamond-reinforced cutting tools using laser-based additive manufacturing. *Additive Manufacturing* 2021; 37: 101602.
- [13] Traxel K, Bandyopadhyay H. First Demonstration of Additive Manufacturing of Cutting Tools using Directed Energy Deposition System: Stellite™-Based Cutting Tools. *Additive Manufacturing* 2019; 25: 460–468.
- [14] Nowakowski L, Skrzyniarz M, Blasiak S, Rolek J, Vasileva D and Tanya Avramova 3Analyzing the Potential of Drill Bits 3D Printed Using the Direct Metal Laser Melting (DMLM) Technology to Drill Holes in Polyamide 6 (PA6). *Materials* 2023; 16(3035): 1-12.
- [15] Jandyal A, Chaturvedi I, Wazir I, Raina, A, Haq M. 3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0. *Sustainable Operations and Computers* 2022; 3: 33–42.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ДИАГНОСТИКА НА АВТОНОМНИ МОБИЛНИ РОБОТИ

DIAGNOSTICS OF AUTONOMOUS MOBILE ROBOTS

Vanya Markova

*Bulgarian Academy of Sciences
Institute of Robotics*

Ventseslav Shopov

*Bulgarian Academy of Sciences
Institute of Robotics*

Abstract

The article discusses the development of a mobile robot diagnostics system based on an embedded Raspberry Pi computer running Linux and using the Robot Operating System (ROS). The system architecture is presented, including hardware and software components, diagnostic modules and monitoring tools. The main methods for collecting, analyzing and visualizing data on the robot's state are described. The results show that the use of the ROS diagnostics framework and system monitoring modules contributes to increasing the reliability and safety of mobile autonomous systems.

Keywords: deep reinforcement learning, formation control, autonomous mobile robots, PPO, multi-agent systems, obstacle avoidance, cooperative behavior

ВЪВЕДЕНИЕ

Развитието на мобилните роботи и тяхното приложение в индустриални и изследователски среди изисква надеждни методи за диагностика и мониторинг. Една от основните трудности е интегрирането на разнообразни сензори и актуатори в реалновремени софтуерни системи. Вградените компютри като Raspberry Pi, комбинирани с операционна система Linux и софтуерната рамка ROS, предоставят достъпно и ефективно решение за изграждане на такива системи [1].

Диагностиката на мобилни роботи включва наблюдение на хардуерните параметри (температура, напрежение, натоварване), състоянието на сензорите и актуаторите, както и на комуникационната среда. Подобна система позволява както реактивно, така и предиктивно откриване на повреди [2].

Управлението на формации от автономни мобилни роботи е ключов проблем в многоагентните системи с широко приложение в области като наблюдение, картографиране, мониторинг на околната среда, търсене и спасяване, както и в интелигентни транспортни системи. Постигането и поддържането на координирана формация между множество роботи представлява значително предизвикателство, особено в динамични и частично непознати среди, където комуникационните ограничения, избягването на препятствия и децентрализираното вземане на решения играят съществена роля.

Диагностичната система, изградена върху Raspberry Pi, Linux и ROS, може да бъде интегрирана в различни сфери на роботиката и автоматизацията. Гъвкавата архитектура позволява адаптиране към специфичните изисквания на приложението, ка-



то се гарантира надеждност и възможност за дистанционно наблюдение.

В индустриалната автоматизация мобилните роботи (Automated Guided Vehicles – AGV и Autonomous Mobile Robots – AMR) изпълняват ключова роля в транспортни и складови системи. Диагностичната система следи състоянието на батерията, двигателите и сензорите, като осигурява предиктивна поддръжка и предотвратява нежелани престои. Това повишава ефективността и безопасността на производствения процес.

В научните изследвания диагностичната система служи като основа за валидиране на алгоритми за управление, навигация и координация на многоагентни системи. Чрез събиране на данни от различни нодули изследователите могат да анализират поведението на робота в реална среда, да идентифицират слабости и да оптимизират алгоритмите.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Архитектурата на диагностичната система е изградена по модулен принцип, като се комбинират хардуерни и софтуерни компоненти, взаимодействащи чрез ROS. Модулният подход позволява лесно разширяване и адаптиране към различни видове мобилни платформи, като образователни роботи, индустриални AGV системи и изследователски прототипи.

Хардуер

- Raspberry Pi – избран като централен изчислителен модул поради своята достъпност, ниска консумация на енергия и поддръжка на Linux-базирани операционни системи. Модели като Raspberry Pi 4 предоставят четириядрен процесор и достатъчно RAM за изпълнение на ROS нодове и диагностика в реално време.

- Сензори – използват се различни типове сензори за навигация и контрол: инерциален модул (IMU) за измерване на

ускорения и ъглови скорости, LiDAR за двумерно картографиране и откриване на препятствия, ултразвукови и инфрачервени сензори за близки разстояния, както и RGB-D камера за възприемане на околната среда.

- Актуатори – включват електродвигатели (DC или BLDC), моторни драйвери с възможност за обратна връзка, както и серво механизми за специализирани задачи (например манипулатори).

- Захранваща система – автономната работа се осигурява от литиево-йонна батерия, снабдена с модул за управление на енергията (Battery Management System, BMS), който предоставя информация за нивото на заряда, напрежението и температурата.

- Комуникационни интерфейси – вградените Wi-Fi и Bluetooth позволяват отдалечено наблюдение и управление, докато USB и GPIO портовете улесняват свързването на сензори и драйвери.

Софтуер

- Linux (Ubuntu/Raspberry Pi OS) – операционната система осигурява управление на процесите, драйвери за хардуерните устройства и поддръжка на мрежови протоколи. Наличието на пакетни мениджъри (apt) улеснява инсталацията и обновяването на ROS и свързани библиотеки.

- ROS (Robot Operating System) – основната софтуерна рамка, която реализира комуникация между отделните модули чрез теми, услуги и действия. ROS предлага готови пакети за диагностика, визуализация и системен мониторинг, които значително съкращават времето за разработка.

- ROS Diagnostics – използва стандартни съобщения (diagnostic_msgs) за публикуване на статуси и предупреждения. Всеки модул (сензорен драйвер, актуатор или системен процес) може да подава информация за своето състояние.



- Инструменти за визуализация – включват `rqt_robot_monitor` за диагностика в реално време, `RViz` за визуално представяне на сензорни данни и `rqt_graph` за наблюдение на комуникационната топология на системата.

Диагностични нодули

- `Sensor monitor node` – проверява честотата и коректността на публикуваните сензорни данни. При отклонение извежда предупреждение за възможна повреда или загуба на връзка.

- `Motor driver monitor node` – следи напрежението, консумирания ток и температурата на моторните драйвери, което позволява навременно откриване на претоварване или прегряване.

- `System monitor node` – наблюдава изчислителните ресурси на Raspberry Pi (CPU, RAM, дисково пространство), както и температурата на процесора. Информацията се използва за превантивна защита от прегряване и претоварване.

- `Network monitor node` – анализира качеството на безжичната и кабелната връзка, следи за загуба на пакети и забавяне в комуникацията между нодовете.

Методи за диагностика

Методите за диагностика в мобилни роботизирани системи имат ключово значение за надеждността и устойчивостта на експлоатация. Основната цел е да се осигури своевременно откриване на грешки, предотвратяване на повреди и поддръжка на стабилна комуникация между модулите. В рамките на предложената система, базирана на Raspberry Pi, Linux и ROS, диагностиката се реализира чрез комбинация от софтуерни пакети, системни логове и графични инструменти за визуализация.

ROS Diagnostics Framework

ROS Diagnostics Framework е централен елемент на системата за диагностика. Той използва стандартни съобщения (`diagnostic_msgs`) за обмен на информация

за състоянието на различните компоненти. Всеки ROS нод може да публикува статус на хардуерен или софтуерен модул, като например:

- OK – модулът функционира нормално;
- Warning – засечени са аномалии или стойности извън оптималния диапазон;
- Error – възникнала е критична грешка, изискваща незабавна намеса.

Предимство на този подход е възможността за централизирано събиране и структуриране на информацията от различни източници. Освен това системата позволява йерархично представяне на диагностичните данни, което улеснява оператора при анализ на сложни системи.

Визуализация

Визуализацията на диагностичните данни е от съществено значение за операторите и инженерите. ROS предоставя няколко инструмента за тази цел:

- `rqt_robot_monitor` – графичен интерфейс, който визуализира диагностичните съобщения в реално време. Потребителят може лесно да идентифицира проблеми чрез цветово кодиране (зелено – нормално, жълто – предупреждение, червено – грешка).

- `RViz` – основен инструмент за триизмерна визуализация на сензорни данни. Освен за навигация и картографиране, `RViz` може да бъде използван и за наблюдение на диагностични данни.

- `rqt_graph` – показва топологията на ROS нодовете и връзките между тях. Чрез този инструмент могат да бъдат открити прекъсвания в комуникацията, неправилно конфигурирани топици или липсващи връзки.

Системни логове

Системните логове допълват диагностичната рамка, като предоставят детайлна информация за събитията и процесите в системата. В предложената архитектура се използват:



- rosout – основен канал за лог съобщения в ROS. Позволява проследяване на статуси, грешки и предупреждения, генерирани от нодовите.

- syslog – системен лог на Linux, който съхранява информация за процеси, драйвери и системни събития.

- journald – част от systemd, която предоставя по-гъвкав механизъм за събиране и филтриране на логове, включително времеви марки и нива на критичност.

Използването на комбиниран логинг осигурява възможност за анализ на събитията както по време на работа на робота, така и постфактум, за целите на отстраняване на проблеми или оптимизация.

Custom Dashboard

За по-удобно взаимодействие между оператор и робот е възможна разработка на custom dashboard – уеб-базирана или десктоп система, която интегрира данни от ROS diagnostics, системни логове и сензорни нодове. Предимствата на този подход включват:

- Отдалечен достъп чрез уеб интерфейс;
- Интерактивни визуализации (графики на температура, натоварване на процесора, ниво на батерията);
- Възможност за изпращане на уведомления и аларми при критични събития;
- Историческо съхранение на данни за предиктивна поддръжка.

Custom dashboard може да бъде реализиран чрез интеграция на ROS с популярни платформи като Grafana или Webviz, което прави системата още по-гъвкава и подходяща за различни сценарии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложената система за диагностика демонстрира възможностите на Raspberry Pi и ROS за интегриране на хардуерно и софтуерно наблюдение в реално време. Гъвкавата архитектура позволява адаптиране към различни приложения и добавяне на нови сензори и диагностични модули. В бъдещи разработки се предвижда използване на машинно обучение за предиктивна диагностика.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Quigley, M., Gerkey, B., Conley, K., et al. (2009). ROS: an open-source Robot Operating System. ICRA Workshop on Open Source Software.
- [2] Siciliano, B., Khatib, O. (2016). Springer Handbook of Robotics. Springer.
- [3] ROS Wiki. diagnostics Package. Available at: <http://wiki.ros.org/diagnostics>
- [4] Raspberry Pi Foundation. (2023). Raspberry Pi Documentation.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

УПРАВЛЕНИЕ НА ФОРМАЦИИ ОТ АВТОНОМНИ МОБИЛНИ РОБОТИ ЧРЕЗ ДЪЛБОКО ОБУЧЕНИЕ С ПОДКРЕПА

FORMATION CONTROLS THROUGH TRAINING WITH REINFORCEMENT LEARNING

Vanya Markova
*Bulgarian Academy of Sciences
Institute of Robotics*

Ventseslav Shopov
*Bulgarian Academy of Sciences
Institute of Robotics*

Abstract

This paper investigates the application of Deep Reinforcement Learning (DRL) for formation control in teams of autonomous mobile robots. The main focus is on the Proximal Policy Optimization (PPO) algorithm, which is used to train agents to maintain a desired formation, avoid obstacles, and navigate efficiently to the goal. A model of a simulation environment with different obstacle densities is presented, in which agents are trained through a trial-and-error strategy, optimizing a reward function. The results show that PPO allows for the implementation of flexible and cooperative behavior with high success rates, even in dynamic and partially unfamiliar environments. A quantitative analysis of the performance in different scenarios is performed, confirming the potential of the DRL-based approach for real-world applications in robotics.

Keywords: deep reinforcement learning, formation control, autonomous mobile robots, PPO, multi-agent systems, obstacle avoidance, cooperative behavior

ВЪВЕДЕНИЕ

Управлението на формации от автономни мобилни роботи е ключов проблем в многоагентните системи с широко приложение в области като наблюдение, картографиране, мониторинг на околната среда, търсене и спасяване, както и в интелигентни транспортни системи. Постигането и поддържането на координирана формация между множество роботи представлява значително предизвикателство, особено в динамични и частично непознати среди, където комуникационните ограничения, избягването на препятствия и децентрализираното вземане на решения играят съществена роля.

Традиционните подходи към управлението на формации обикновено се базират на предварително дефинирани правила, йерархични стратегии от типа "лидер-последовател" или консенсусни методи. Макар да са ефективни в структурирани среди, тези подходи често демонстрират ограничена адаптивност в сложни и динамични условия, при които агентите трябва автономно да се приспособяват към промени и смущения. През последните години, методите, базирани на обучение – и по-специално дълбокото обучение с подкрепление (Deep Reinforcement Learning, DRL) – се утвърждават като обещаваща алтернатива,



предлагаща гъвкави, мащабируеми и устойчиви решения [1], [4].

В настоящото изследване се разглежда приложението на DRL за управление на формации в екипи от автономни мобилни роботи. По-конкретно, фокусът е върху използването на алгоритъма Proximal Policy Optimization (PPO) – съвременен DRL метод, известен със своята стабилност и ефективност при обучение [1]. PPO се прилага за обучение на агенти в симулационна среда, така че те да могат да по-стигат и поддържат желана формация, като същевременно навигират към целева точка в среди с различна плътност на препятствията.

Управлението на многоагентни системи чрез обучение с подкрепление е обект на интензивно изследване в последното десетилетие. В литературата се срещат различни подходи за управление на роботизирани формации, включително методи, базирани на правила, оптимизация, поведенческо клониране и дълбоко обучение. Методите от типа "лидер-следовател" и консенсус-базирани стратегии са често използвани поради своята относителна простота и устойчивост [2], [3].

С нарастващите възможности на невронните мрежи и изчислителните ресурси, DRL започна да се използва за управление на сложни задачи в роботиката. Подходи като Deep Q-Networks (DQN), Trust Region Policy Optimization (TRPO) и PPO показват добри резултати при задачи с непрекъснати състояния и действия [1], [4]. PPO, в частност, се използва широко заради своя баланс между стабилност на обучението и изчислителна ефективност. В контекста на формационно управление, DRL се използва както в централизирани, така и в децентрализирани сценарии, като често се комбинира с симулационни среди като Gazebo, ROS, Unity или custom OpenAI Gym среди [7], [8].

Няколко изследвания демонстрират успеха на DRL в управление на рояци от роботи, напр. чрез колективно обучение, обучение с кооперативни агенти или конкурентна динамика [5], [6]. Все още обаче остават отворени предизвикателства, свързани със скалируемостта, безопасността, обяснимостта и трансферното обучение на политики между различни среди и конфигурации.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Общ преглед на DRL и PPO

Обучението с подкрепление е парадигма, в която агентите се учат да вземат последователни решения чрез взаимодействие със средата. Deep Reinforcement Learning (DRL) съчетава тази парадигма с дълбоки невронни мрежи, за да се справя със среди с висока размерност. Алгоритъмът Proximal Policy Optimization (PPO) е част от семейството на policy-gradient методите и използва съотношение между нова и стара политика за стабилизиране на обучението чрез ограничаване на промяната в политиката.

PPO е избран в настоящото изследване поради своята стабилност, сравнително бързо обучение и доказана ефективност в непрекъснати задачи.

Формулиране на задачата

Всеки агент (робот) се моделира като точка с ограничена скорост и поле на зрение. Задачата се формулира като епизодична Markov Decision Process (MDP), където всеки агент има частично наблюдение и състояние, включващо:

- неговата собствена позиция и скорост,
- относителни позиции на съседите в комуникационния радиус,
- относителна позиция на целта,
- близост до препятствия.

Пространството на действията включва промяна на линейната и ъглова скорост на агента.



Функция на възнаграждение

Функцията на възнаграждение комбинира няколко компонента:

- R_1 : положителна стойност за поддържане на формация;
- R_2 : наказание за сблъсък с препятствия или други агенти;
- R_3 : положителна стойност за приближаване и достигане на целта;
- R_4 : наказание за загуба на връзка с формацията.

Общата функция:

$$R_{total} = w_1 \cdot R_1 + w_2 \cdot R_2 + w_3 \cdot R_3 + w_4 \cdot R_4$$

Заклучение и бъдеща работа

Изследването демонстрира ефективността на PPO за управление на координирано поведение в многоагентни системи. Бъдещата работа включва:

1. Реализация в реална среда чрез симулационен трансфер.
2. Комбиниране на DRL с MPC и консенсусни подходи.
3. Скалиране до десетки агенти.
4. Използване на GNN и рекурентни мрежи.
5. Централизирана критика с децентрализирана политика.

ЕКСПЕРИМЕНТИ И РЕЗУЛТАТИ

Симулационна среда

Използвана е custom симулационна среда, базирана на OpenAI Gym. Средата позволява:

- дефиниране на различна плътност и разположение на препятствия,
- настройка на броя агенти и формации (линейна, V-образна и др.),
- визуализация и запис на епизоди.

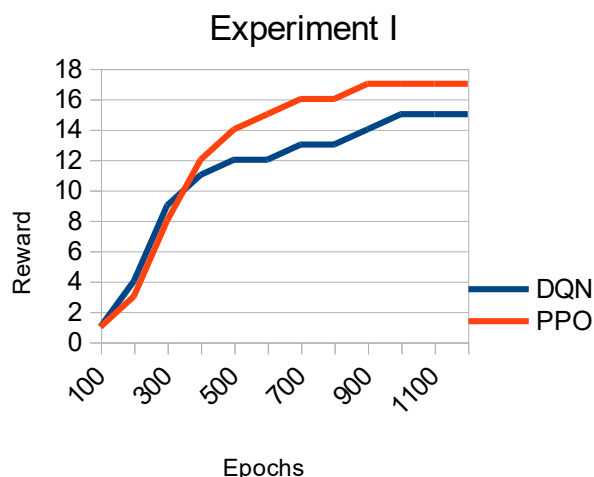
Обучението се извършва с помощта на Stable-Baselines3, като всеки агент използва индивидуална PPO-политика.

Експериментална постановка

Конфигурация

- Брой агенти: 5
- Тип формация: линейна и V-образна
- Размер на картата: 20x20 единици
- Продължителност на епизод: 500 стъпки
- Начални условия: случайни позиции около начална точка

Резултатите показват, че PPO води до висока успеваемост (92%) и стабилно поддържане на формацията в среда с малко препятствия. В по-сложната среда, успеваемостта е 76%, като се наблюдават по-чести сблъсъци и временно нарушаване на формацията. Агенти развият адаптивни стратегии, включително регулиране на скоростта и възстановяване на формацията след преминаване на тесни участъци.



Фиг. 1. Производителността на двата алгоритъма в случай на колектив от мобилни роботи в условията на малък брой препятствия, като метриката е сумарната награда

Алгоритъмът за подсилване е реализиран с помощта на пакета OpenAI Baselines[13]. Алгоритмите DDQN и PPO са модифицирани, за да могат да обработват претеглена награда. За да могат агентите да запазят



формацията, е необходимо наградата при достигане на целта да е по-голяма, когато агентите запазят формацията.

Baselines е библиотека, написана на Python, с различни алгоритми за обучение с подсилване. Важно предимство е, че Baselines работи добре с Tensorflow[14].

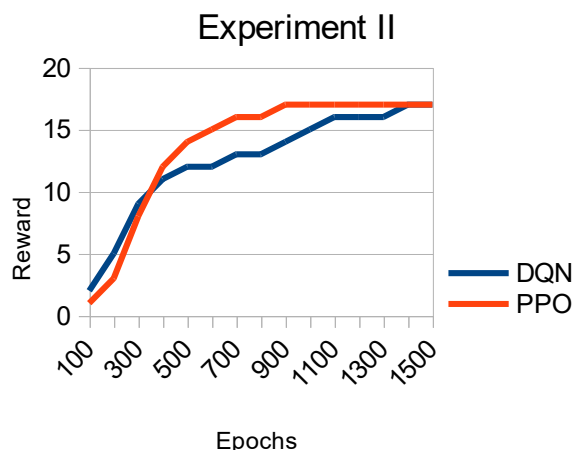
По този начин изчисленията могат да работят както на CPU, така и на GPU. За това изследване алгоритмите за обучение с подсилване първоначално са обучени на GPU, използвайки CUDA 10.1, паралелна изчислителна платформа, разработена от NVIDIA. Използваният GPU е NVIDIA GeForce GTX 1660, а CPU е 8-ядрен Intel (R) Xeon (R) CPU E7.

Индикатори за оценка: За да се сравнят DDQN и PPO, е необходимо да се дефинират показатели. Обобщената награда е избрана като основен индикатор.

В това проучване проведохме два експеримента. И в двата експеримента сравняваме два дълбоко обучени алгоритъма с поддръжка: DDQN и PPO.

В първия експеримент изследваме производителността на двата алгоритъма в случай на колектив от мобилни роботи в условията на малък брой препятствия, като метриката е сумарната награда.

Във втория експеримент сравняваме производителността на тези два алгоритъма в случай на голям брой препятствия. В този случай, за да се достигне една и съща обща награда, са необходими повече епохи. Общата награда след 1500 епохи е еднаква и за двата алгоритъма.



Фиг. 2. Сравняваме производителността на тези два алгоритъма в случай на голям брой препятствия

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резултатите показват, че PPO води до висока успеваемост (92%) и стабилно поддържане на формацията в среда с малко препятствия. В по-сложната среда, успеваемостта е 76%, като се наблюдават по-чести сблъсъци и временно нарушаване на формацията. Агентите развиват адаптивни стратегии, включително регулиране на скоростта и възстановяване на формацията след преминаване на тесни участъци.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“



ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. Schulman et al., "Proximal Policy Optimization Algorithms," arXiv:1707.06347, 2017.
- [2] R. Olfati-Saber, "Flocking for multi-agent dynamic systems," IEEE TAC, vol. 51, no. 3, 2006.
- [3] W. Ren and R. W. Beard, *Distributed Consensus in Multi-vehicle Control*, Springer, 2008.
- [4] V. Mnih et al., "Human-level control through deep reinforcement learning," Nature, vol. 518, 2015.
- [5] C. Yu et al., "Multi-agent DRL for traffic control," IEEE TITS, vol. 21, 2019.
- [6] H. Zhu et al., "DRL for decentralized collision avoidance," IEEE TII, vol. 17, 2020.
- [7] OpenAI Baselines. [https:// github.com/openai/baselines](https://github.com/openai/baselines)
- [8] A. Raffin et al., "Stable-Baselines3," JMLR, vol. 22, 2021.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

АКТИВНА МИКРОМРЕЖА НИСКО НАПРЕЖЕНИЕ В ГРАДСКА СРЕДА - ПОКАЗАТЕЛИ НА КАЧЕСТВО НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ЕНЕРГИЯ

ACTIVE MICROGRID IN AN URBAN LOCATION - LOW VOLTAGE POWER QUALITY INDICATORS

Dimitrina Koeva

Технически университет- Габрово

*DEPARTMENT OF ELECTRIC POWER DISTRIBUTION AND ELECTRICAL EQUIPMENT, CENTER OF
COMPETENCE "SMART MECHATRONIC, ECO- AND ENERGY-SAVING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES",
TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO, 5300 GABROVO, BULGARIA*

Lyubomir Dimitrov

Технически университет- Габрово

*DEPARTMENT OF ELECTRIC POWER DISTRIBUTION AND ELECTRICAL EQUIPMENT, CENTER OF
COMPETENCE "SMART MECHATRONIC, ECO- AND ENERGY-SAVING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES",
TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO, 5300 GABROVO, BULGARIA*

Georgi Bankov

Технически университет- Габрово

*DEPARTMENT OF ELECTRIC POWER DISTRIBUTION AND ELECTRICAL EQUIPMENT, TECHNICAL
UNIVERSITY OF GABROVO, 5300 GABROVO, BULGARIA*

Abstract

The research and analyses presented in this paper are an attempt to prove the concept that a flexible and efficient energy transformation requires a gradual digitalization of the energy system, starting from the inside out, i.e., from the low-voltage micro- and nano-grids, which mostly integrate low-power photovoltaic power plants and consumers with similar demand profiles. This article analyse the initial results of a series of measurements of electrical energy quality indicators taken from an active microgrid connected to a 198 kWp PV system.

Keywords: active microgrid; power quality; renewable generation.

ВЪВЕДЕНИЕ

В условията на все по-нарастваща интеграция на възобновяеми енергийни източници, микромрежите се превръщат в активна локална/децентрализирана енергийна микросистема, която може да произвежда, разпределя и съхранява електрическа

енергия при два основни режима на работа: свързана с основната мрежа или в автономен режим. Интересът към активните микромрежи е провокиран заради тяхната гъвкавост, надеждност, възможност за локално управление. В състава си съвременните активни микро мрежи могат да включват раз-

лични източници на енергия (фотоволтаични централи, вятърни генератори, батерии, дизелови агрегати и др.), товари (битови и индустриални потребители, зарядни станции за електромобили и др.). Енергийната ни система се намира в период на енергийна трансформация. Този преход се характеризира с големи децентрализирани възобновяеми мощности (най-често фотоволтаични централи) и изграждане на системи за съхранение в начален етап. И двата процеса се случват без предварителна прогнозна оценка за присъединителен капацитет и разпределение на товарите. През годините не е извършван какъвто и да е анализ на разликата между нетна генерация и нетно потребление, липсва прогнозен анализ на потребление на страна ниско напрежение. Изходът от този на пръв поглед странен феномен е изследване на микро мрежите, анализ на проблемите при присъединяване на фотоволтаични централи (ФЕЦ), оценка на възможностите за интегриране на системи за съхранение на „излишъците“ от енергия и управление чрез товара.

ИЗЛОЖЕНИЕ

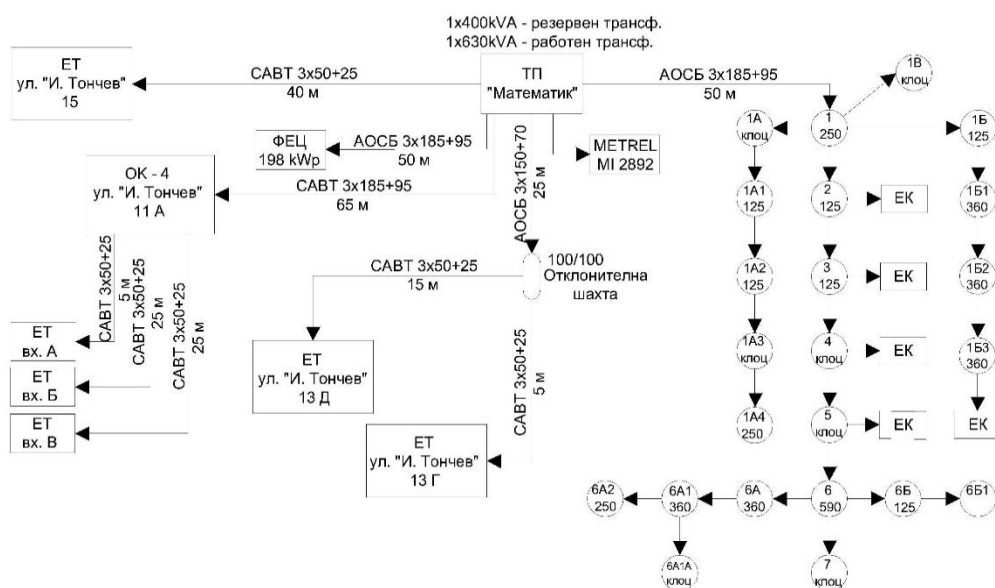
В статията се анализират първите резултати от поредица измервания на показатели на качество на електрическата енергия в активна микромрежа с присъединена ФЕЦ с мощност 198 kWp. Схемата на свързване на потребителите е TN-C, местата на присъединяване на ФЕЦ и мрежовия анализатор се представят на фиг. 1. Разглежда се активна микромрежа ниско напрежение. Измерванията са проведени с анализатор на качеството на електрическа енергия Metrel MI 2892 – фиг.1, който е част от оборудването на лаборатория С 7.3 „Разработване на съвременни енергийно-ефективни електрокомпоненти и системи с приложение в индустриалния сектор“. Измервателният уред разполага с редица функционални

възможности, като измерване на ефективната стойност на електрическите величини (true RMS) и възможност за анализ на качеството на електрическата енергия (измерване по стандарт 50160). Притежава висок клас на точност, както и графично и таблично представяне на резултатите [1].



Фиг. 1. Анализатор на качеството на електрическата енергия METREL MI 2892

Наблюдаваме следните електрически величини в точката на присъединяване на ФЕЦ: напрежения в трите фази U_A , U_B , U_C и неутралата U_N ; ток в трите фази и неутралата I_A , I_B , I_C , I_N и общо хармонично изкривяване при максимален ток във всяка фаза и неутралата TDD%, Total Demand Distortion, TDD I_1 , I_2 , I_3 , I_N . Наблюдаваме общото хармонично изкривяване на тока TDD I_1 , I_2 , I_3 , I_N , тъй като този показател измерва хармоничния ток на всяка фаза на електрозахранваща мрежа, като процент от максималния ток на консуматорите, индикатор за хармонично изкривяване. По този начин се отчитат условията на натоварване на активната микромрежа. Този показател е по-полезен от общото хармонично изкривяване (THD), което използва основния ток като отправна точка. Счита се, че TDD е ключов показател за осигуряване на съответствие със стандартите за качество на електроенергията.



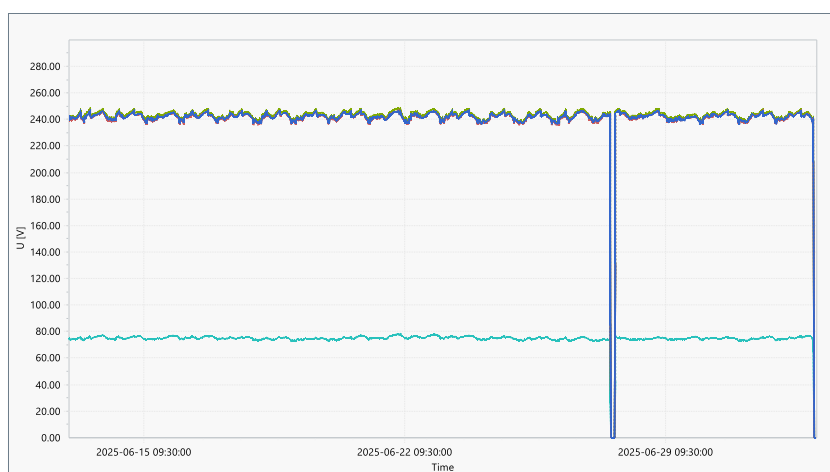
Фиг. 2. Принципна електрическа схема на активната мрежа, към която има присъединена ФЕЦ.

Всички измервания са с клас на точност съгласно действащите стандарти и нормативни изисквания за функционалност и електромагнитна съвместимост (EMC): EN 61010-1, IEC/EN 61000-4-30, Class A; IEC/EN 61557-12; IEC/EN 61000-4-7, Class I; IEC/EN 61000-4-15; EN 50160; IEEE 1448; IEEE 1459; IEEE 519; EN 61326.

Качеството на електроенергията се определя от стандарти, прилагани в нашата страна: БДС EN 50160:2006, IEC 61000-3-1, IEC 61000-3-4.

Избираме период на измервания от 13.06. до 03.07.2025 г., през интервал от 10 минути - период от годината, който се характеризира с максимално интензивна соларна генерация. Визуализация на измерените величини се представя на фигури 3, 4 и 5.

Широкото приложение на устройства с нелинеен характер на товара налага необходимостта за установяване на изменението на показателите за качеството на електрическата енергия.



Фиг. 3. Изменение на фазовите напрежения – U_A , U_B , U_C , U_N

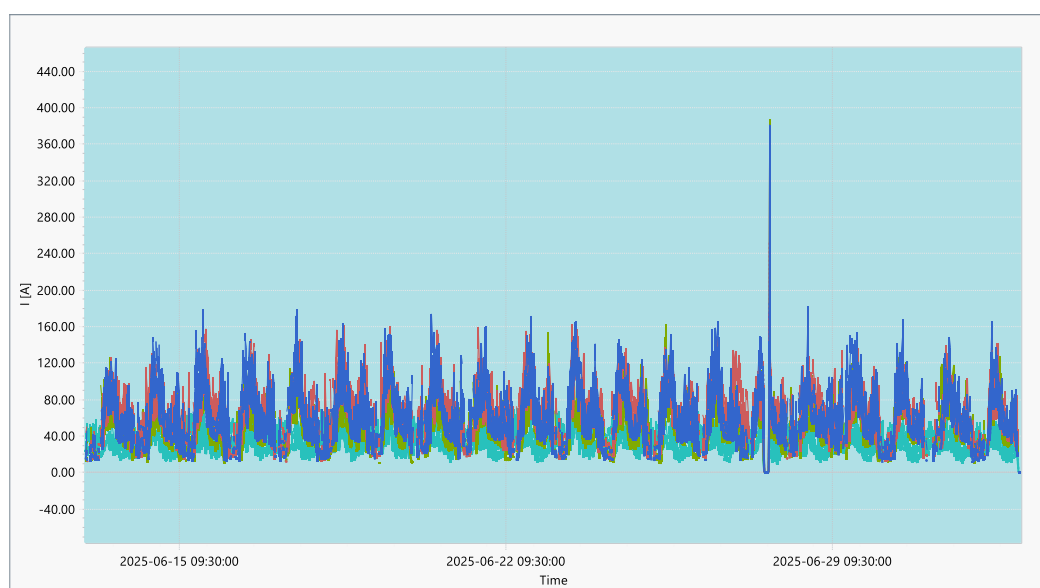


Изменението в нивата на фазовите напрежения и напрежението в нулевия проводник са в допустимите граници и отговарят на стандарта EN 50160 [4], който се отнася до качеството на електроенергията в мрежи ниско и средно напрежение и задава допустимите граници на всички параметри на напрежението. Според него допустимите бавни промени на напрежението се оценяват чрез средноквадратичната стойност за интервал от 10 min, чиито относителни промени около номиналната стойност трябва

да са до $\pm 10\%$ през 95% от седмицата [2].

За кратък период от време е измерено ”пропадане” на захранващото напрежение вследствие атмосферно пренапрежение и последващо задействане на релейната защита. След възстановяване на релейната защита електрическата мрежа получава захранване с номинални стойности на напрежението.

На фигура 4 са дадени нивата на изменение на фазовите токове, както и тока в нулевия нулев проводник.



Фиг. 4. Изменение на фазовите токове – I_A , I_B , I_C , I_N

Широкото приложение на консуматори с нелинеен характер на товара налага необходимостта за установяване на изменението на нивата на висши хармоници в разглежданата електрическата мрежа.

Съществено внимание е отделено на висшите хармоници на тока и общото им хармонично изкривяване. Общото изкривяване на търсенето (TDD) определя хармоничното изкривяване на тока в електрическата система като процент от тока при пълно натоварване. Това е индекс за качеството на електроенергията, който свързва хармонич-

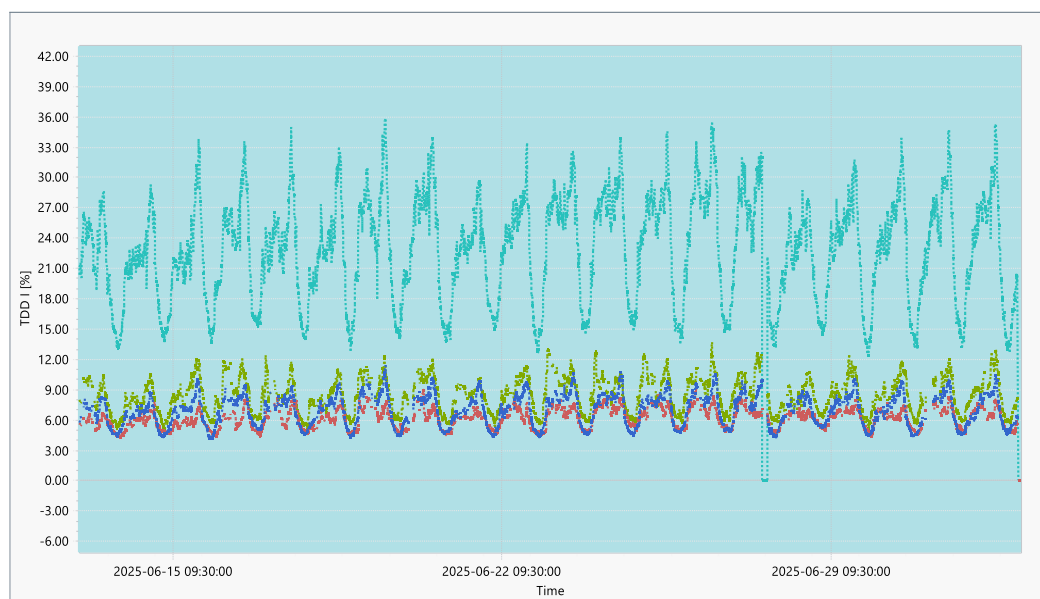
ното съдържание на тока с максималния ток, който системата може да поеме, като осигурява стабилна мярка за изкривяване, която отразява общото въздействие върху системата, особено при променящи се условия на натоварване. Това е разликата с общото хармонично изкривяване (THD), което е съотношение към основния токов компонент и може да варира значително в зависимост от натоварването.

$$TDD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left[\frac{I_h^2}{I_L^2} \right]} \cdot 100\%, \quad (1)$$

където: h – номер на хармоника; I_h – амплитуда на хармоник на тока с пореден номер h ; I_L – максимален ток на товара. Връзката между (TDD) и (THD) е:

$$TDD = THD \cdot \frac{I_1}{I_L} \quad (2)$$

Както се вижда от (1) общото изкривяване на търсенето (TDD) оценява хармоничния състав на токове между крайния потребител и източника на енергия, т.е. показва въздействието на хармоничните изкривявания в активната микромрежа.



Фиг. 5. Хармонично изкривяване на тока в % от тока при пълно натоварване, TDD I_1 , I_2 , I_3 , I_N

Получените резултати показват, че в 100% от измерените стойности на общото хармонично изкривяване на токовете (THDi) на трите фази – I_1 , I_2 и I_3 са в допустимата стойност от 25% дадена в БДС IEC 61000-3-4 – Електромагнитна съвместимост. Част 3-4 Граници – ограничаване на емисиите на хармоничните токове в слаботокови системи, захранване на оборудване, с номинален ток над 16 A [3]. Изключение правят хармониците на тока – I_N в неуралния нулев проводник, където се забелязват краткотрайни повишаванията в нивата им.

При пълно натоварване, както е в конкретния случай (THD) стойността за текущите хармоници на тока в нулевия проводник е равна на (TDD), което оказва нега-

тивно въздействие върху активната микромрежа и всички присъединени потребители на електрическа енергия. Тези стойности водят до нежелано увеличаване на температурата на тоководещите части и необходимостта от преоразмеряване им.

TDD дава представа за текущото изкривяване като процент от тока при пълно натоварване и е най-добрият индекс за качеството на електрическата енергия, който обяснява текущите хармоници в края на веригата на потребителя. Хармоничното изкривяване на напрежението в общата разпределителна система, което определя консумацията на електроенергия, зависи от хармониците на тока и импеданса на системата при различни хармонични честоти. Потребителите на електроенергия са свър-



зани към електроенергийната система в точката на общо свързване (Point-of-Common Coupling, PCC). Коефициентът на късо съединение (Short-Circuit Ratio, SCR) определя импеданса на системата и е от значение, тъй като импедансът се влияе и ограничава от тока на късо съединение в системата. SCR описва колко голямо е влиянието на хармониците на напрежението върху качеството на електроенергията в системата в резултат на хармониците на тока, произвеждани от потребителя. SCR може да се представи като:

$$SCR = \frac{I_{SC}}{I_L}, \quad (3)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

TDD може да се използва като надежден индикатор за потенциалното въздействие на хармониците върху всички участници в активната микромрежа. При ниски натоварвания в мрежата/ниско потребление високи нива на THD може да доведат до нисък TDD, което показва, че общото въздействие на хармониците е незначително. От друга страна при високо потребление в мрежата, близко до номиналното натоварване стойностите на THD и TDD са равни, което може се оказва значителен проблем с качеството на електроенергията. За разлика от THD, който се променя с натоварването, TDD осигурява по-стабилна и последователна мярка за оценка на влиянието на хармоничното изкривяване в активните микромрежи, следователно трябва да се предпочита при процеси на дигитализация. Също така TDD е особено полезен при оценката на потенциалното прегряване на оборудването, влошаването на работата на трансформаторите и други проблеми в електрическата система, особено в проми-

шлени среди с променливи натоварвания. Следва да се има предвид при по-нататъшни изследвания, че съществува нормативна празнина при оценка на въздействието на електронните преобразуватели в активните микромрежи, работещи в честотния диапазон 2-3 kHz до 200 kHz.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии"

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Димитров Л., С. Рачев. Електрически измервания за оценка на работата на промишлена компресорна система. Енергие форум, 24-27 Юни 2025, "Св. Константин и Елена", Варна, България. Сборник с доклади, стр. 356-370. ISSN: 2367-6728.
- [2] Димитров Л., Анализ на качеството на електрическата енергия в обществен обект. Международна научна конференция УНИТЕХ 2023, 17-18 Ноември 2023, Габрово, България, Сборник с доклади т. I, стр. I-108 I-112. ISSN 1313-230X.28.
- [3] БДС IEC 61000-3-4 – Електромагнитна съвместимост. Част 3-4 Граници – ограничаване на емисиите на хармоничните токове в слаботокови системи, захранване на оборудване, с номинален ток над 16 А.
- [4]. БДС EN 50160:2003. Характеристики на напрежението на електрическата енергия, доставяна от обществените разпределителни системи.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ВЛИЯНИЕ НА БИТОВИТЕ ПОТРЕБИТЕЛИ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ ВЪРХУ КОЕФИЦИЕНТА НА МОЩНОСТ В МРЕЖИ НИСКО НАПРЕЖЕНИЕ

IMPACT OF HOUSEHOLD ELECTRICITY CONSUMERS ON THE POWER FACTOR IN LOW-VOLTAGE GRIDS

Lyubomir Dimitrov

Технически университет- Габрово

*DEPARTMENT OF ELECTRIC POWER DISTRIBUTION AND ELECTRICAL EQUIPMENT, CENTER OF
COMPETENCE "SMART MECHATRONIC, ECO- AND ENERGY-SAVING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES",
TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO, 5300 GABROVO, BULGARIA*

Dimitrina Koeva

Технически университет- Габрово

*DEPARTMENT OF ELECTRIC POWER DISTRIBUTION AND ELECTRICAL EQUIPMENT, CENTER OF
COMPETENCE "SMART MECHATRONIC, ECO- AND ENERGY-SAVING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES",
TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO, 5300 GABROVO, BULGARIA*

Abstract

Domestic electricity consumers have significant impact on the normal operation of low-voltage electricity distribution grids. A large amount of consumers have active-inductive loads, which directly affect the efficiency and quality indicators of the electricity distribution system. This report presents a part of the measurements and examines the change in the power factor (PF) in an urban low-voltage electrical grids.

Keywords: power factor; power quality analyzer; power distribution network; power quality.

ВЪВЕДЕНИЕ

Електроразпределителните мрежи ниско напрежение (НН) осигуряват хранване (чрез подземен кабел или въздушна електропроводна линия) на определен брой потребители по нейното трасе. Изискванията за номинален ток на разпределителните мрежи се определят от броя на включените потребители и средния товар на един потребител.

Принципните ограничителни параметри на разпределителната мрежа са: максимал-

ният ток, който тя може да пропуска неограничено дълго време и максималната дължина на кабела, при която при протичане на максималния ток да не се надхвърля максималния допустим пад на напрежение.

Тези ограничаващи условия означават, че големината на товара, който електроразпределителните предприятия могат да свържат към своите разпределителни мрежи НН, е ограничен.

Установеният ред, използван от различни доставчици на електроенергия, се раз-



личава чувствително и затова е трудно да се посочат стандартни стойности.

В условията на значителен ръст на фотоволтаични централи с малка мощност, присъединени към мрежи НН, следва да се отчитат още: сумарният товар, който вече е включен към дадената разпределителна мрежа; разположението на ФЕЦ по трасето на разпределителната мрежа, т.е. близо ли е до подстанция, или е близо до отдалечения край на мрежата, близо ли е до други товари и т.н. Преносът ѝ по електрическата мрежа е свързан с редица негативни последици като например повишени загуби по електропреносните съоръжения [4].

Много често в градски условия битовите и малки индустриални потребители се захранват през активна разпределителната мрежа НН. Максимално допустимият товар, който може да бъде присъединен по този начин, се ограничава обикновено от наличието на резервна мощност на трансформатора в подстанцията.

На практика обаче:

- големите електрически товари (например, над 300 kVA) изискват кабели с голямо сечение, при това, ако центъра на товара не е разположен близо до трафопоста, този метод може да бъде икономически неизгоден;

Поради тези причини директно включени линии към мрежи НН (от 230/400 V до 253/440 V) обикновено се прилагат за захранване на товари с номинална мощност от 80 до 250 kVA.

Потребителите, захранването на които се осъществява от активни мрежи НН в градска среда могат да бъдат: жилищни сгради; магазини и търговски сгради; малки предприятия, работилници и бензиностанции и др.

От голямо значение за правилното функциониране на електроснабдителните съоръжения и електрообзавеждането в тези мрежи, е поддържане на качество на захранва-

щото напрежение. В по-широк смисъл това означава съответствие с нормативните изисквания по отношение големината на напрежението и на честотата, допустим диапазон на отклонението на напрежението, непрекъснато електроснабдяване с електроенергия, с изключение на случаите при изключване за планово техническо обслужване, или изключвания, предизвикани от аварии по мрежата или други необичайни ситуации, запазване синусоидалната форма на напрежението [1].

Известно е, че реактивната мощност поддържа електромагнитните системи на трансформатори и двигатели в наситено състояние и това е част от техния принцип на работа. Преносът на реактивна мощност и енергия по електрическата мрежа е свързан с редица негативни последици като например повишени загуби по електропреносните съоръжения.

В електропреносната мрежа има присъединени огромно количество индуктивни товари и сумарно тяхната реактивна мощност, която циркулира между генераторите и консуматорите, има стохастичен и трудно прогнозируем характер на изменение. Можем да оценим нейното влияние в отделни участъци от мрежата чрез коефициент по мощност (power factor, PF). Във всички мрежи нелинейността се променя с присъединяване на нови потребители, в т.ч. инвертори на ФЕЦ.

В тази връзка са извършени практически измервания на част от градска електроразпределителна мрежа ниско напрежение (0.230/0.400 V AC).

В конкретният случай разглеждаме активна мрежа в градски условия, с присъединена ФЕЦ 198 kWp. В жилищните райони голямата част от електроразпределителните мрежи са реализирани като кабелни линии (КЛ) и въздушни електропроводни линии (ВЕЛ), изпълнени с усукани изолирани проводници (УП) с предварително изчислено и

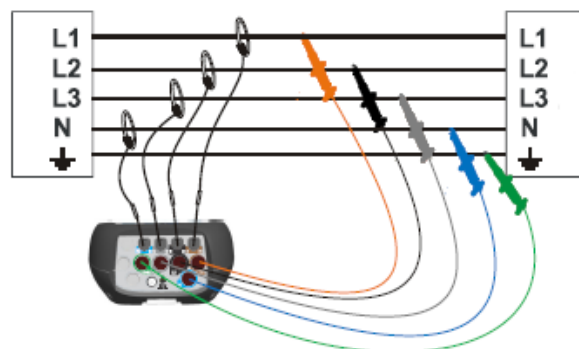
избрано сечение. Най-често те се реализират по схема TN-C, при която неутралния проводник има функцията на работен и защитен. Проведените измервания са насочени към установяване на изменението на коефициента на мощност (PF) при преобладаващи битови потребители в тази мрежа, които са с изразен активно-индуктивен характер на товара. Измерванията са проведени с анализатор на качеството на електрическа енергия METREL MI 2892 – фиг.1, който е част от оборудването на лаборатория С 7-3 „Разработване на съвременни енергийно-ефективни електрокомпоненти и системи с приложение в индустриалния сектор“. Измервателният уред разполага с редица функционални възможности, като измерване на ефективната стойност на електрическите величини (true RMS) и възможност за анализ на качеството на електрическата енергия (измерване по стандарт БДС EN 50160:2006). Притежава висок клас на точност, както и възможност за графично и таблично представяне на резултатите [2].



Фиг. 1. Анализатор на качеството на електрическата енергия METREL MI 2892

В настоящия доклад са извършени измервания на коефициента на мощност при индуктивен и капацитивен характер на

товара, както и общо хармонично изкривяване при максимален ток във всяка фаза – $PF1_{cap+}$, $PF2_{cap+}$, $PF3_{cap+}$, $PF_{tot_{cap+}}$, $PF1_{ind+}$, $PF2_{ind+}$, $PF3_{ind+}$, $PF_{tot_{ind+}}$.

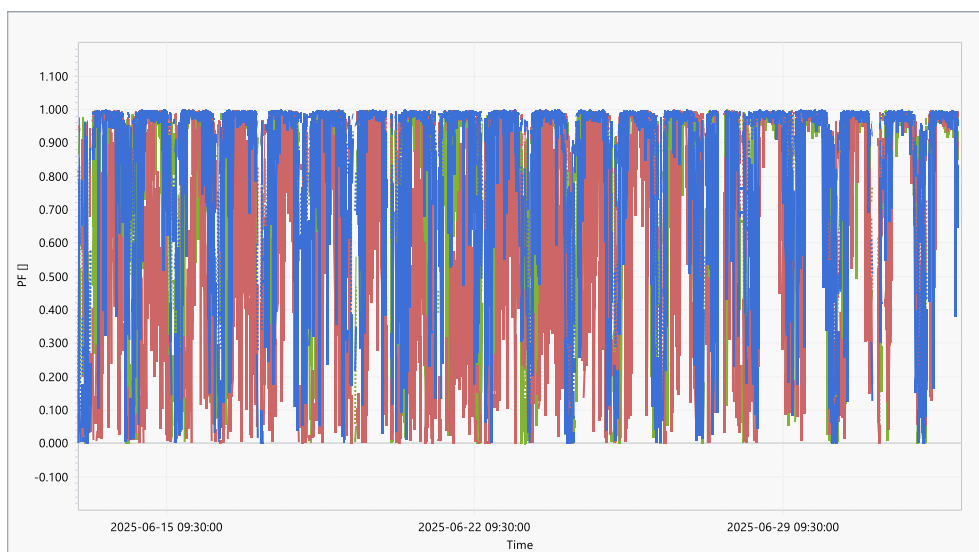


Фиг. 2. Принципно схема на свързване на METREL MI 2892

Всички измервания са с клас на точност съгласно действащите стандарти и нормативни изисквания за функционалност и електромагнитна съвместимост (EMC): EN 61010-1, IEC/EN 61000-4-30, Class A; IEC/EN 61557-12; IEC/EN 61000-4-7, Class I; IEC/EN 61000-4-15; EN 50160; IEEE 1448; IEEE 1459; IEEE 519; EN 61326. Качеството на електроенергията се определя от стандарти, прилагани в нашата страна: БДС EN 50160:2006, IEC 61000-3-1, IEC 61000-3-4 [3].

Избран е характерен период от годината (интензивна соларна генерация), като измерванията са извършени от 13.06. до 03.07.2025 г., през интервал от 10 минути. Този период от годината се характеризира със значителна консумация на електрическа енергия, най-вече за охлаждане на помещенията в жилищата.

Получените резултати от проведените измервания на изменението на коефициента на мощност (PF) са дадени на фигури 3, 4 и 5.

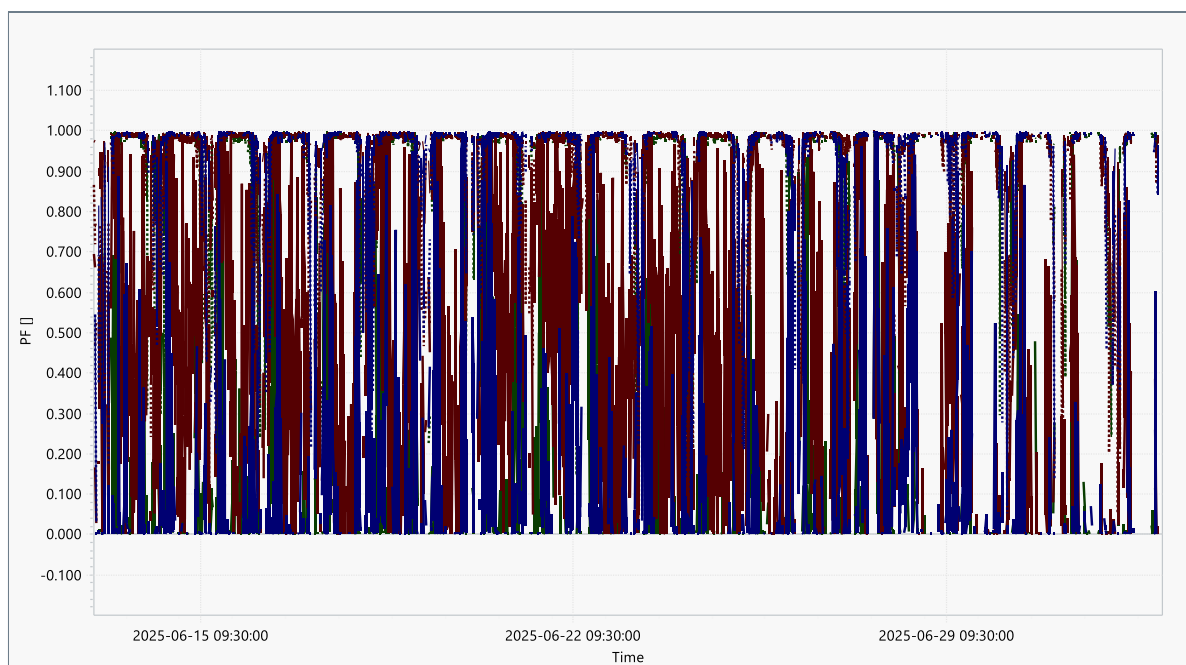


Фиг. 3. Коефициент на мощността при капацитивен товар на трите фази PF_{cap+} – $PF1$, $PF2$, $PF3$

На фигура 3 са дадени графични резултати, представящи изменението на стойностите на коефициента на мощност при капацитивен товар – PF_{cap+} , които достига максимална стойност: $PF = 0.98$.

Тази стойности се дължат главно на слабонатоварените кабелни линии

през определени периоди от денонощието – моменти, в които кабелната линия е слабо. Тези мерки най-често са свързани с проектиране и изграждане на компенсиращи уредби. електропреносната мрежа за ниско напрежение и създава предпоставки за тоководещите части.



Фиг. 4. Коефициент на мощността на трите фази при индуктивен товар PF_{ind} – $PF1$, $PF2$, $PF3$

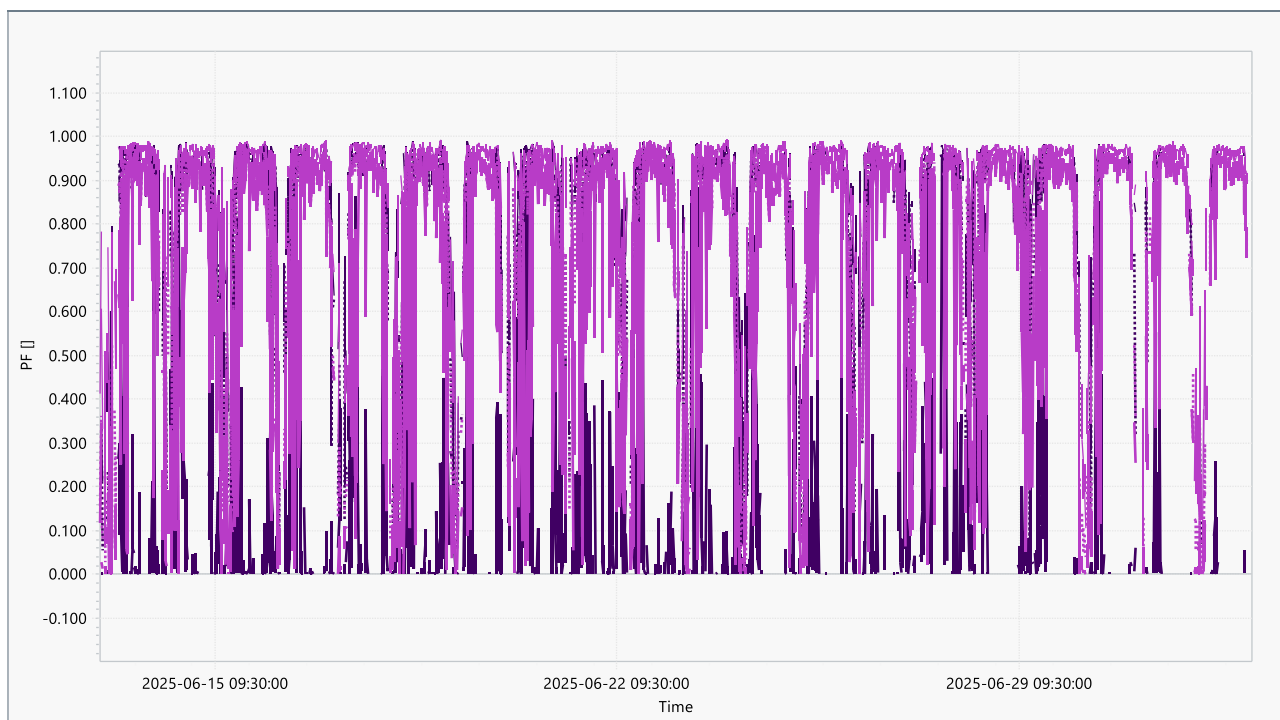


Работата на електрическите мрежи с капацитивен фактор на мощността налага необходимостта от компенсиране на реактивните товари, като това има пряко отношение към качеството на електрическата енергия и повишаване на ефективността на електроснабдителната система. Това налага да се вземат технически и организационни мерки. Тези мерки най-често са свързани с проектиране и изграждане на компенсиращи уредби

На фигура 4 са дадени графични резултати при работа на електрозахранващата мрежа с индуктивен характер на товара и максимална стойност $PF_{ind} = 0.99$. През голямата част от времето, потребителите консумират освен активна енергия и индуктивна. Реактивната мощност с индуктивен

характер се обуславя от битови консуматори: различни видове климатични и вентилационни системи, задвижвания с различни видове електрически двигатели и инвертори за тяхното управление. Освен това в редица електроуреди са вградени голям брой индуктивни елементи.

При тези измервания са получени различни стойности на коефициента на мощност (PF), като най-ниските за трите фази са: L1 – 0.23, за L2 – 0.34, за L3 – 0.15. Максималните стойности, които са отчетени за трите фази са: L1 – 0.99, за L2 – 0.97, за L3 – 0.97. Тези колебания се дължат на честите изменения в характера на товара и са предпоставка за влошаване на експлоатационните характеристики на електрическите съоръжения.



Фиг. 5. Общ коефициент на мощност при индуктивен и капацитивен товар – $PF_{tot ind+}$, $PF_{tot cap+}$



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подобряване режимите на работа на електропреносната мрежа ниско напрежение в значителна степен зависи от извършване на периодични измервания и анализ на качеството на електрическата енергия и поддържане на коефициента на мощност (PF) в необходимите граници. Това ще допринесе за вземане на навременни мерки за увеличаване на експлоатационните възможности на електрическите съоръжения и намаляване на финансовите разходи.

Подобряването на коефициента на мощност води до намаляване на токовото натоварване на тоководещите части, като шини, кабели, електрически апарати и др. Намалява загубите на активна енергия. Допринося за нормална работа на генераторите в електрическите централи и ненужното им претоварване.

Реализираните измервания могат да послужат за извършване на допълнителен анализ и мерки за по ефективно използване на разглежданата електропреносна мрежа.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Наредба № 3 от 9.06.2004 г. за устройството на електрическите уредби и електропроводните линии.
- [2] Димитров Л., С. Рачев. Електрически измервания за оценка на работата на промишлена компресорна система. Енергиен форум, 24-27 Юни 2025, "Св. Константин и Елена", Варна, България. Сборник с доклади, стр. 356-370. ISSN: 2367-6728.
- [3] БДС EN 50160:2003. Характеристики на напрежението на електрическата енергия, доставяна от обществените разпределителни системи
- [4]. Списание Енерджи ревю, TLL Media, брой 4, 2015.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ИЗСЛЕДВАНЕ ВЛИЯНИЕТО НА ГЕОМЕТРИЯТА И СИЛАТА НА ДЕФОРМИРАНЕ ВЪРХУ ГРАПАВОСТТА НА ОБРАБОТЕНАТА ПОВЪРХНИНА НА МЕСИНГ CUZN39PB3, СЛЕД ПОВЪРХНОСТНА ПЛАСТИЧНА ДЕФОРМАЦИЯ С ИНСТРУМЕНТИ ОТ “FERROTIC C”

STUDYING THE EFFECT OF GEOMETRY AND DEFORMATION FORCE ON THE ROUGHNESS OF THE MACHINED SURFACE OF CUZN39PB3 BRASS, AFTER SURFACE PLASTIC DEFORMATION WITH TOOLS FROM "FERROTIC C"

Kalin Anastasov

Technical University of Gabrovo, BG

Petya Daskalova

Technical University of Gabrovo, BG

Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract

The article presents the results of a study of a machined surface using the method of surface plastic deformation of test specimens made of CuZn39Pb3 brass. The working elements of the device are made of “FERROTIC C” cemented carbide alloy. The 2-D parameters of roughness Ra and surface were measured. The study was conducted at variable values of the radius of the deforming element R and the pressing force Fb to determine their influence on the studied parameters of the surface texture.

Keywords: Surface plastic deformation; Brass; Roughness; Ferrotic C; Radius; Pressing force .

ВЪВЕДЕНИЕ

В съвременното производство на конструкционни елементи, все по-голямо внимание се обръща на състоянието на повърхностния слой на детайлите, тъй като той е в пряк контакт с другите елементи или пряк контакт с околната среда. Състоянието на този слой от гледна точка на грапавост, твърдост, остатъчни напрежения е от решаващо значение за уморната дълготрайност, корозионната устойчивост, изно-

соустойчивостта, трибологичното поведение и други [1-6] .

Съществуват редица методи за модификация на повърхностните слоеве на конструкционните елементи в зависимост от експлоатационните условия – термични, химико-термични, електро-химични, физични, обработване чрез повърхностна пластична деформация (ППД) и други. ППД се прилага основно като превенция срещу уморно разрушаване, поради полу-



чаване на минимална грапавост, остатъчни напрежения на натиск, издребнена и хомогенизирана микроструктура, повишена микротвърдост и други. ППД може да се реализира по два основни метода – динамичен и статичен. Статичният е особено подходящ при модифициране на повърхностните слоеве на ротационни и плоски детайли и е приложим в промишлен вариант поради адаптирана към съвременните металорежещи машини екипировка, използва същите кинематични движения за осъществяване на процеса, както и металорежещите инструменти. Статичните методи са два основни типа, различавайки се по вида на триенето в зоната на контакт – триене при търкаляне *Roller burnishing (RB)* и триене при плъзгане *Slide burnishing (SB)*. ППД с триене при плъзгане се реализира с прости в конструктивно отношение инструменти, като деформиращият елемент основно е от диамант *Slide diamond burnishing (SDB)*, но е възможно приложението и на други инструментални материали [6-13]. Върху обработката чрез *SB*, влияят редица фактори – геометрия на инструмента, скорост на плъзгане, подаване, брой преходи, сила на деформиране, коефициент на триене на трибологичната двойка – инструмент заготовка, грапавост на повърхнината от предходна обработка, изходна твърдост на заготовката, вида на използваната МОТ, кинематична точност и стабилност на системата – машина, инструмент, детайл. Всички те са във взаимни корелационни връзки и пряко влияят на получената повърхнина. Чрез *SB* технология може да се обработват различни материали – въглеродни, легирани, инструментални и неръждаеми стомани, цветни метали и сплави, в различно състояние по отношение на твърдостта[12].

Широко използвана в машиностроенето цветна сплав на основа мед, за произвеж-

дане на конструкционни елементи в автомобилната промишленост, корабостроенето, електротехниката, архитектурата, медицината, това е месинга. Притежава добри антифрикционни качества, корозоустойчивост, обработваемост, чрез класическите технологии – леене и рязане. В зависимост от процентното съдържание на елемента цинк има три вида месинг, различаващи се по своята микроструктура – със съдържание на цинк до 35% - *еднофазен α месинг*, 36% - 46% - *двуфазен ($\alpha+\beta$) месинг* и 46% - 50% - *β месинг*.

Обект на настоящата работа е изследване на някои от характеристиките на повърхностния слой на пробни тела изработени от месинг марка *CuZn39Pb3*, получени след ППД, спадащ към групата на двуфазните месинги. Те имат отлична обработваемост чрез рязане, но поради наличие на β фаза имат влошена пластичност при стайна температура, без предварителна термична обработка.

Цел на статията е изследване 2-D параметъра *Ra* от повърхностната текстура, след ППД (*Slide burnishing*) процес, на заготовки от месинг *CuZn39Pb3*, в състояние на повърхнината - след струговане, без предварителна термична обработка – отгряване и използване на деформиращ елемент изработен от “FERROTIC C”.

ИЗЛОЖЕНИЕ

1. МАТЕРИАЛИ И МЕТОДИ

1.1 Материал

Използваният материал е месинг, марка *CuZn39Pb3* с диаметър $\Phi 23\text{mm}$, с химичен състав показан в табл.1. За изследване на химичния състав на материала е използван спектрометър *BELEG LAB 3000s*, представен на фигура 1.

Табл. 1. Химичен състав на месинг $CuZn39Pb3$

Zn	Sn	Si	Mn	Pb	Fe	P	Cu
33.41	0.13	0.02	0.03	3.23	0.2	0.06	62.87



Фиг. 1. Спектрометър BELEG LAB 3000s

Твърдостта HBW е измерена съгласно EN ISO 6506 с помощта на уред за изпитване на твърдост по метода на Бринел с диаметър на индентора $D = 4,83 \text{ mm}$, натоварване $F = 3000 \text{ Kgf}$ и време на задържане 15 с. Изпитанието е проведено на твърдомер марка *INNOVATEST*, представен на фигура 2.

Резултатите след изпитване на твърдост са – HB = 153,6.

Фиг. 2. Твърдомер *INNOVATEST*

1.2 Машина, инструменти и приспособления

Експериментите са проведени на струго-фрезови център с ЦПУ, марка “РАЙС”, мод. T2500, представен на фигура 3.



Фиг. 3. Струго-фрезови център с ЦПУ, марка “РАЙС”, мод. T2500

Приспособленията използвани при експериментите са:

- Въртящ център;
- Патронник хидравличен;
- Зъбен център, представен на фигура 4.



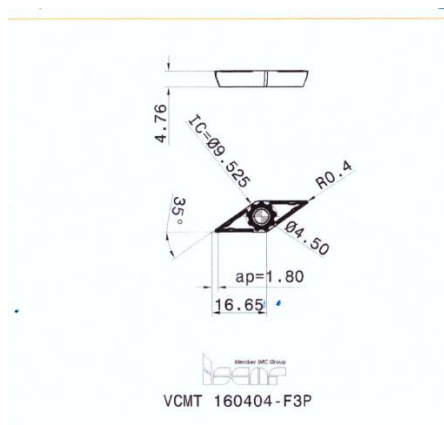
Фиг. 4. Зъбен център

Режещи инструменти използвани при експеримента:

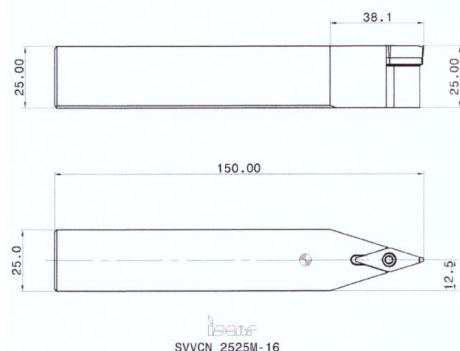
На база на обработваемия материал с неговия вид и физико-механични характеристики, е прието обработката на опитните образци да се извърши с металокерамични сменяеми пластини *VCMT 160404-F3P* на фирма ISCAR [14], установени в призматичен държач *SVVCN 2525M-16* [14], като са осигурени следните геометрични параметри:

- главен установъчен ъгъл $\kappa_p = 72,5^\circ$;
- спомагателен установъчен ъгъл ; $\kappa_p' = 72,5^\circ$;
- главен заден ъгъл $\alpha_0 = 7^\circ$;
- радиус при върха на инструмента $r_e = 0.4\text{mm}$.

Пластината и държача с техните форма и размери са представени на фигури 5 и 6.

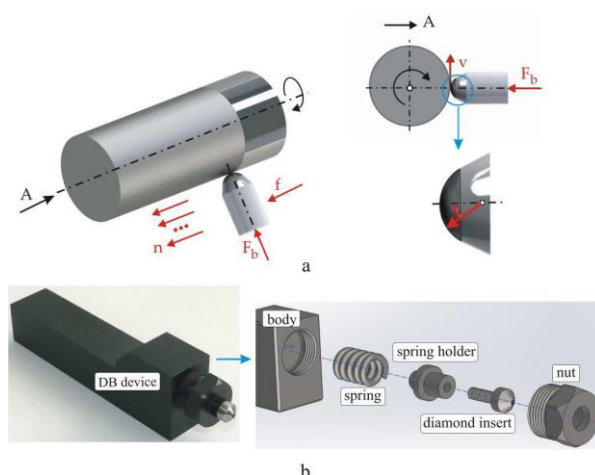


Фиг. 5. Пластина *VCMT 160404-F3P*



Фиг. 6. Държач *SVVCN 2525M-16*

За реализиране на процеса на повърхностна пластична деформация (ППД) е използвано устройство с регулиране силата на притискане F_B , със сменяеми накрайници изработени от инструментален материал „*FERROTIC C*“, с различни радиуси. Приспособлението и принципа му на работа е представено на фигура 7 [11] .



Фиг. 7. Приспособление за осъществяване на процеса на ППД

1.3 Лабораторно оборудване за изследване на обработените образци

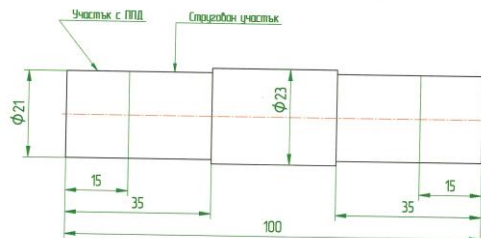
За изследване грапавостта на обработената повърхнина след струговане и ППД е използван използван грапавомер „*Mitutoyo*“.

1.4 План на експеримента

За изследване влиянието на геометрията на деформиращия елемент и силата на деформация върху грапавостта на обработената повърхнина са проведени еднофакторни експерименти, при следните постоянни елементи на режима на рязане при струговане: скорост на рязане $V_C = 50$, m/min , подаване $f = 0,05$, mm/rev и дълбочина на рязане $a_p = 1$, mm . Процесът на ППД е проведен при следните постоянни параметри: $V_C = 70$, m/min , подаване $f = 0,05$, mm/rev . Променливите параметри при ППД са: $F_B = 50N, 100N, 150N, 200N, 250N, 300N, 350N, 400N$ и променлив радиус на деформиращия елемент: $r = 3mm, 4mm, 5mm$, като са изработени пробни тела за всяка комбинация.

Експеримента е проведен в условията на прилагане на МОТ на водна основа и за процеса на струговане и за този на ППД.

Схема на пробното тяло с форма и размери е представена на фигура 8, а на фигура 9 и 10 са представени опитните постановки при струговане и ППД, в работни условия.



Фиг. 8. Форма и размери на пробното тяло



Фиг. 9. Опитна постановка за процеса на струговане



Фиг. 10. Опитна постановка за процеса на ППД

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ И КОМЕНТАРИ

Измерените стойности на параметъра R_a , при различните радиуси на деформиращия елемент са систематизирани в таблици 2 – 4.

Табл.2. Стойност на параметъра R_a , при $r=3mm$, на деформиращия елемент

Пробно тяло	Сила на деформиране	Измерена грапавост след струговане	Измерена грапавост след ППД
1	50	0.595	0.440
2	100	0.633	0.434
3	150	0.573	0.246
4	200	0.553	1.076
5	250	0.542	1.097
6	300	0.562	1.380
7	350	0.480	1.510
8	400	0.529	1.594

Табл.3. Стойност на параметъра R_a , при $r=4mm$, на деформиращия елемент

Пробно тяло	Сила на деформиране	Измерена грапавост след струговане	Измерена грапавост след ППД
1	50	0.589	0.161
2	100	0.658	0.311
3	150	0.665	0.307
4	200	0.677	0.238
5	250	0.639	0.221
6	300	0.642	0.221
7	350	0.620	0.352
8	400	0.614	0.507

Табл. 4 Стойност на параметъра R_a , при $r=5\text{mm}$, на деформиращия елемент

Пробно тяло	Сила на деформиране	Измерена грапавост след струговане	Измерена грапавост след ППД
1	50	0.623	0.170
2	100	0.581	0.211
3	150	0.584	0.244
4	200	0.606	0.205
5	250	0.590	0.296
6	300	0.534	0.389
7	350	0.564	0.332
8	400	0.580	0.258

Графична интерпретация на измерените стойности на параметъра R_a , след процеса на ППД са представени на фигури 11 – 13.



Фиг. 11. Графика на R_a , при $r = 3\text{mm}$, на деформиращия елемент



Фиг. 12. Графика на R_a , при $r = 4\text{mm}$, на деформиращия елемент



Фиг. 13. Графика на R_a , при $r = 5\text{mm}$, на деформиращия елемент

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено експериментално изследване на 2-D параметъра R_a , от повърхностната текстура, след ППД (*Slide burnishing*) процес, на заготовки от месинг CuZn39Pb3 , в състояние на повърхнината - след струговане, без предварителна термична обработка - отгряване и използване на деформиращ елемент изработен от “*FERROTIC C*”. Експериментите са проведени с деформиращи елементи с различна геометрия (радиуси), при различни нива на силата на деформиране F_B .

Резултатите показват, че параметрите радиус на деформиращия елемент r и силата на деформиране F_B , оказват значително влияние върху грапавостта на обработената повърхнина. С увеличаване на радиуса на деформиращия елемент, влиянието на деформационната сила намалява. При минимален радиус $r = 3\text{mm}$ и прилагане на сила F_B над 150N , има влошаване на грапавостта над стойности получени след струговане.

Наблюдава се, че при нива на деформационната сила $F_B = 150\text{N}$ радиуса на ин-



струмента има най – слабо влияние върху грапавостта.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Duncheva G, Surface integrity prez prizmata na surface engineering. Universitetsko izdatelstvo, “Vasil Aprilov”, Gabrovo, 2023, ISBN: 978-954-683-691-5.
- [2] Duncheva, G.V.; Maximov, J.T.; Anchev, A.P.; Dunchev, V.P.; Argirov, Y.B. Improvement in wear resistance performance of CuAl8Fe3 single-phase aluminum bronze via slide diamond burnishing. *J. Mater. Eng. Perform.* **2022**, *31*, 2466–2478.
- [3] Abdullah, R., Beithou, N. Burnishing effects on friction stir welding of Al-Alloy 7075 T6. *Global Journal of Researches in Engineering: A Mechanical and Mechanics Engineering*, 2014; 14(3), 12–19.
- [4] Astankhov V.P. (2010) Surface Integrity – Definition and Importance in Functional Performance (Ed., J. Paulo), Surface Integrity in Machining, Springer – Verlag London Limited, e-ISBN 978-1-84-882-974-2.
- [5] Shiou, F. J., Huang, S. J., Shih, A. J., Zhu, J., Yoshino, M. Fine surface finish of a hardened stainless steel using a new burnishing tool. *Procedia manufacturing*, 2017; 10, 208–217. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.048>
- [6] Duncheva, G. V., Maximov, J. T., Anchev, A. P., Dunchev, V. P., Argirov, Y. B. Multi-objective optimization of the internal diamond burnishing process. *Materials and Manufacturing Processes*, 2022; 37(4), 428–436. <https://doi.org/10.1080/10426914.2021.1981937>
- [7] J. Maximov, G. Duncheva, A. Anchev, V. Dunchev, and Y. Argirov, "Effect of diamond burnishing on fatigue behaviour of AISI 304 chromium-nickel austenitic stainless steel," *Materials*, vol. 15, no. 14, p. 4768, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15144768>
- [8] Y. Argirov, J. Maximov, G. Duncheva, A. Anchev, V. Dunchev, and T. Mechkarova, "Evolution of surface integrity characteristics and mechanical behavior of diamond burnished and turned AISI 304 steel specimens after prolonged exposure to natural seawater," *Coatings*, vol. 15, no. 1, p. 31, 2025. <https://doi.org/10.3390/coatings15010031>
- [9] G. V. Duncheva, J. T. Maximov, A. P. Anchev, V. P. Dunchev, and Y. B. Argirov, "Multi-objective optimization of the internal diamond burnishing process," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 37, no. 4, pp. 428–436, 2022. <https://doi.org/10.1080/10426914.2021.1981937>
- [10] M. Korzynski, K. Dudek, and K. Korzynska, "Effect of slide diamond burnishing on the surface layer of valve stems and the durability of the stem-graphite seal friction pair," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 11, p. 6392, 2023. <http://dx.doi.org/10.3390/app13116392>
- [11] J. Maximov and G. Duncheva, "The correlation between surface integrity and operating behaviour of slide burnished components—A review and prospects," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 5, p. 3313, 2023. <https://doi.org/10.3390/app13053313>
- [12] Duncheva, G.V.; Maximov, J.T.; Anchev, A.P.; Dunchev, V.P.; Argirov, Y.B.; Kandevara-Ivanova, M. Enhancement of the wear resistance of CuAl9Fe4 sliding bearing bushings via diamond burnishing. *Wear* **2022**, *510–511*, 204491.
- [13] Maximov, J.T.; Duncheva, G.V.; Anchev, A.P.; Dunchev, V.P.; Anastasov, K.; Argirov, Y.B. Sustainable Diamond Burnishing of Chromium–Nickel Austenitic Stainless Steels: Effects on Surface Integrity and Fatigue Limit. *Appl. Sci.* **2024**, *14*, 9031.
- [14] <https://www.iscar.com/eCatalog/>



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ТЕХНОЛОГИЧНИ ВЪЗМОЖНОСТИ НА 5-ОСЕН СТРУГОВ ЦЕНТЪР TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF A 5-AXIS TURNING CENTER

Hristo Yakimov

TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO

*Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"
(CCSMEESST)*

Abstract

With the development of mechanical engineering and modern production, flexibility in the production of various types of parts, from those with elementary geometry to complex-profile volumetric surfaces, is extremely important. The integration of high-end machine tools combined with the machine tool's ability for multi-axis machining meets one of the conditions for flexibility. The Competence Center "Intelligent Mechatronic, Eco- and Energy-Saving Systems and Technologies" at the Technical University of Gabrovo has a metal-cutting machine of the turning center class with the ability to perform up to 5-axis machining. The purpose of the report is to show the main advantages and capabilities of the metal-cutting machine for performing precise multi-axis machining

Keywords: 5-axis machining, turning center, multi-axis machining

ВЪВЕДЕНИЕ

Металорежещите машини са основно оборудване за механичното обработване. Разнообразието на металорежещи машини като видове, типове и габарити е голямо и се дължи на разнообразието от форми и габарити на детайлите и методи за обработването им [1].

Пред металорежещите машини се поставят високи изисквания по отношение на тяхната работна точност, производителност, надеждност, енергопоглъщаемост и др. Налагат се изисквания за гъвкавост и адаптивност към бързо променящите се условия на пазара и потребителското търсене. Едно от решенията за удовлетворяването на тези изисквания е създаването и използването на машини с програмно управление, които са носители на една

принципно нова технология със следните характеристики. При обработване на детайлите инструментите описват извънредно сложни траектории, обаче всяка траектория се състои от участъци, които при всички разглеждани машини могат да са само четири вида:[1-3].

- ✓ Линеини;
- ✓ Дъги от окръжности;
- ✓ Участъци за позициониращо движение;
- ✓ Участъци минаващи по резби.

В едно изречение се програмира или движение на един участък на траекторията, или фиксирана последователност от движения по няколко участъка. Граничната точка между два съседни участъка се нарича възлова точка[2].



ИЗЛОЖЕНИЕ

Към днешна машина с цифрово програмно управление стават все по-сложни, с разширяващи се технологични възможности и кинематични възможности за цялостно (завършено) обработване на даден детайл или сборна единица детайли.

Това подобрение налага целостното и широкоползвано наименованието на машините с цифрово програмно управление „обработващи центри“ или „многоинструментални машини“. Така една машина, при едно установяване на детайла, може да изпълни разнообразни по характер обработки (пробиване, фрезование, разстъргване и др.), както и контрол.

Металорежещите машини са изградени от голям брой възли и елементи с определено функционално предназначение, обособени в определен брой системи: геометрична, кинематична и т.н. Всяка от тези системи се проектира самостоятелно, след което всички системи се сглобяват при спазване на изискванията за съвместимост и комплектност [1].

Важна характеристика са и кинематичните възможности, изразяващи се в броя едновременно управлявани премествания (D) на работните органи и детайла. Диапазонът е твърде висок от 2.5D при обикновените стругови и фрезови машини, 3D до 5D при обработващите центри и много повече при специални машини.

Основно звено за качествено получено изделие е технологичния процес за изработване. При съвременните обработващи центри, чието програмно управляващата програма е кодирано описание на технологичния процес на специален език, спазването на който ред е задължително, като съществуват различни варианти за създаване или представяне на технологичния процес:

- ✓ CAD/CAM програмиране;
- ✓ ISO програмиране;

- ✓ Диалогово Програмиране;
- ✓ WOP системи обединяващи CAD-CAM системата със системата за CNC на конкретната машина.

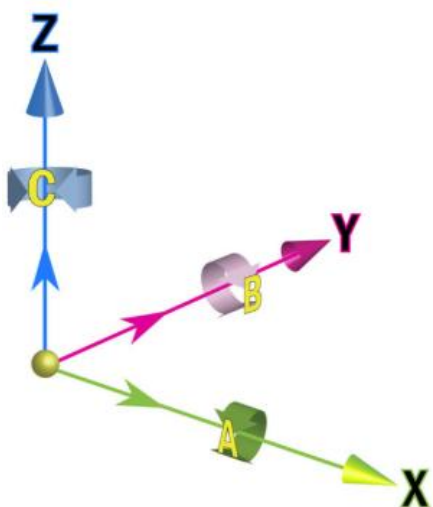
Стругов център RAIS TM 2500 (фиг.1), с който разполага лаборатория C1.2. „Интелигентни системи за проектиране и производство на високо-технологични продукти в Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии е с WOP система за управление, която дава по добри възможности за съставяне на управляващи програми.



Фиг. 1. Стругов център RAIS TM 2500

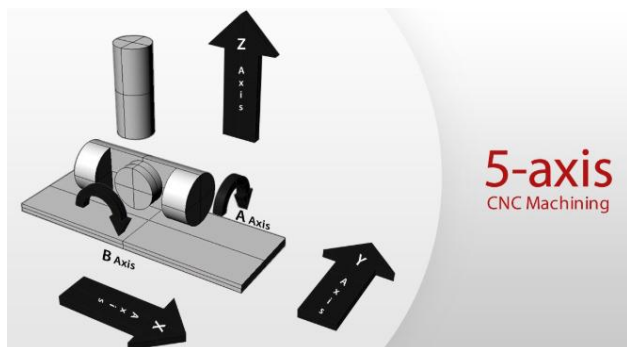
Оси при стругов център RAIS TM 2500

Металорежещите машини разполагат с до шест степени на свобода - X, Y, и Z линейни и A, B, C ротационни около тях (фиг. 2).



Фиг. 2. Координатна система с шест степени на свобода

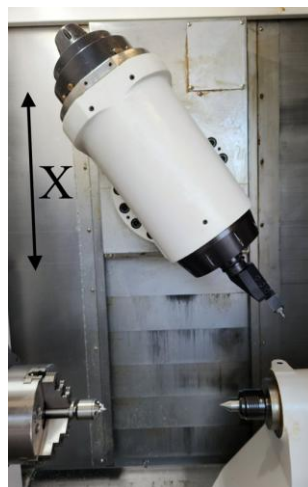
Класическите изпълнения са стругови машини – двуосни, фрезови машини триосни, и разширения според изискванията на машината останалите оси А, В, С могат да са върху различни изпълнителни звена, като въртяща се маса, наклоняща се маса (фиг. 3), синхронизирани движения между фрезово вретено и делителен апарат за обработка на винтови повърхнини, зъбни профили при висока точност на позициониране на детайла.



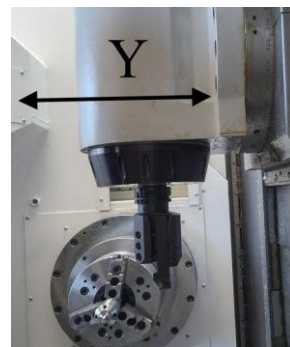
Фиг. 3. Компановка на 5-осна металоуреждаща машина с наклоняваща се маса

Струговият център RAIS TM 2500 разполага с 5 оси, 3 от които линейни (X, Y, Z) показани на фигура 4а, 4б и 4в и две

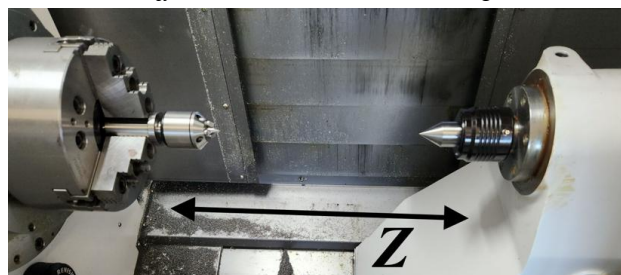
ротационни (В и SP3) показани на фигура 6а и 6б.



а



б

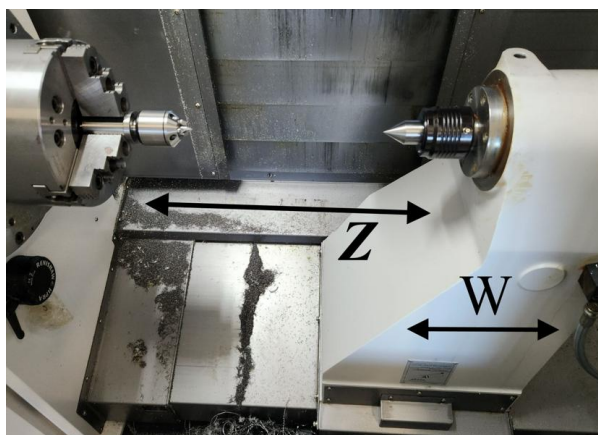


в

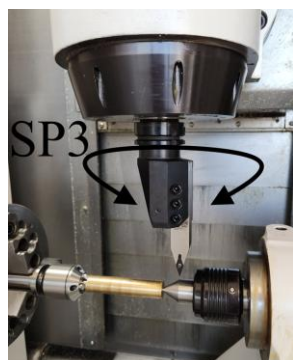
Фиг. 4. Оси при стругов център райс
а-движение на фрезовото вретено във
вертикално направление ос X, б-движение на
фрезовото вретено по ос Y, спрямо линията на
центрите, в-движение на фрезовото вретено
хоризонтално по ос Z

Струговият център разполага и с програмно управление на задното седло дефинирано под ос W (фиг. 5). Програмното управление увеличава автоматизацията на машината и качеството на обработка. В процеса на обработка на детайли с увеличен линеен размер е задължително закрепване на две упори, като от изключителна важност е силата на натиск. При намалени сили, детайла е нестабилен, а при прекомерни съществува риск от деформация на детайла, всички тези недостатъци са ели-

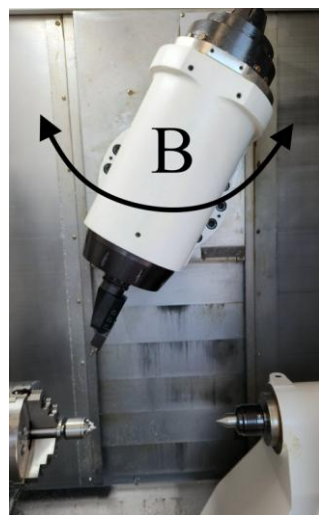
минирани с възможността за програмно задаване на силата на задното седло.



Фиг. 5. Ос на задното седло



а



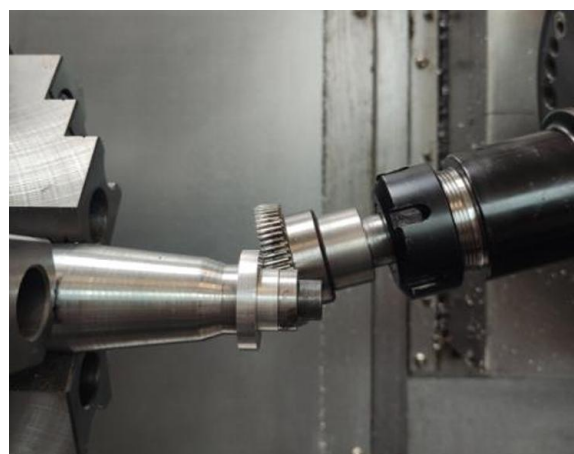
б

Фиг. 6. Ротационни оси при стругов център райс
а – ос на инструмента, б – ос на фрезовото
вретено

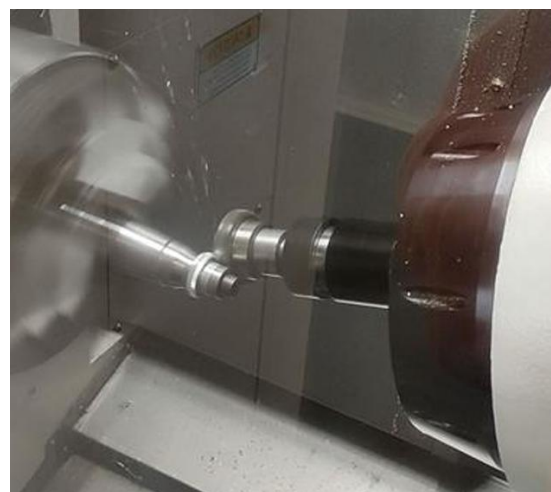
Струговия център разполага с възможност за синхронизация между оста на главното движение на рязане и ос SP3, което разширява технологичните възможности на металоурежещата машина.

С използване на синхронизация на осите бяха обработени експериментални образци по метода зъбоструговане и защитен дисертационен труд на тема: „Обработване

на зъбни профили върху машини с цифрово програмно управление“ за присъждане на образователна и научна степен доктор на маг. инж. Христо Якимов, като за осъществяване на процеса рязане се реализират различни ъгли на кръстосване между осите Z и B. Стойността на ъгъла е от изключително значение за качествените параметри на обработваните зъбните колела. Последователни етапи от реализирането на процеса върху струго-фрезови обработващ център T2500 са показани на фиг. 7а и 7б.



а



б

Фиг. 7. Реализиране на метода
зъбоструговане

а – Установяване на инструмент и детайл
под ъгъл, б – реализиране на процеса рязане



Извършени са и изследвания от гл. ас. д-р Анастасов, като е изследвано и моделирано влиянието на износването на режещия инструмент върху “2D” параметъра на повърхностната текстура на повърхнината R_a , оказващ влияние върху функционалните свойства на повърхностите на конструкционните елементи на заготовки от средновъглеродна стомана марка C45, в състояние след термообработка – подобряване [4].

Често пъти при обработка на детайли се налага строго установяване и фиксиране на вретения възел. За осъществяване на точно позициониране установяване и фиксиране на възела машината разполага с „дискова спирачка“ (фиг.7), което изключително надеждно спомага установяването спрямо програмното изискване. Допълнително предимство на влиянието в динамиката на машината.



Фиг. 8. Фиксиращо устройство

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лаборатория С1.2. “Интелигентни системи за проектиране и производство на високо-технологични продукти в Център за компетентност, “Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии разполага с 5-осен струго-фрезови обработващ център RAIS, което

дава възможност експериментална работа и обработка на различни видове детайли, комбинация от различни видове обработки. Създава се възможност за комбинация от различни параметри на режима на рязане и оптимизация на процесите.

Направения анализ на оборудването показва възможността за изследване и експериментални тестове при обработка на материалите чрез стружкоотнемане.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, “Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Метев Х., Крумов К. „Металорежещи машини“ Университетско издателство “Васил Априлов” – Габрово, 2023 ISBN 978-954-683-683-0
- [2] Караколов Л., Данчева В. „Металорежещи машини с ЦПУ“ Издателство “Техника“, София 1993 Литературен източник. Литературен източник. Литературен източник.
- [3] Александрова И. “CNC машини, инструменти и технологии” Университетско издателство “Васил Априлов” – Габрово, 2023 ISBN 978-954-683-680-9
- [4] Анастасов К. „Изследване влиянието на износването на инструмента върху грапавостта на обработената повърхнина, при струговане на стомана 45, в закалено състояние“ XXII INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE 03-06.09.2025 Machines technologies materials 2025 ISSN 2523-0021, 291-294



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

СЕНЗОРИ И СЕНЗОРНИ СИСТЕМИ – РАЗРАБОТВАНЕ И ИЗСЛЕДВАНИЯ

SENSORS AND SENSOR SYSTEMS – DEVELOPMENT AND RESEARCH

Toshko Nenov

Technical University of Gabrovo, Bulgaria

Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies", Bulgaria

Abstract

This paper presents the equipment available in laboratory C3.1 "Sensors and sensor systems" at the Center of competence "Intelligent mechatronic, eco- and energy-saving systems and technologies". The equipment is categorized into technological, measuring, and calibrating instruments. The main characteristics of the devices and installations are described, along with their current applications and further potential in the development, research, and calibration of sensors and sensor systems.

Keywords: sensors, sensor systems, measuring instruments, calibrators, sol-gel technology.

ВЪВЕДЕНИЕ

Съвременните технологии са базирани на използването на сензори от различен тип. Сензорите преобразуват физични, химични и биологични величини в електрически сигнал, който служи като входен сигнал в измервателните устройства и в системите за управление.

Сензорите са навсякъде около нас. Те са в телефони, домакински уреди, автомобили, самолети, роботи, индустриални машини и устройства и др., като осигуряват информация за околната среда и състоянието на системите, в които са вградени [1]. Съвременните сензори и сензорни системи намират приложение в такива области като „умен дом“ [2], „умен град“ [3], „прецизно земеделие“ [4], в медицината [5] и др. Няма област от нашия живот, която да не е свързана със сензорите. Сензорните техно-

логии се развиват непрекъснато, като се появяват нови видове сензори и се усъвършенстват съществуващите за по-голяма точност и функционалност.

Сензорните системи обединяват сензори от еднакъв или различен тип и имат широко приложение в домашната автоматизация и сигурност, здравеопазването, индустриалната автоматизация, автомобилната индустрия, мониторинга на околната среда, земеделието и др. [6]. Интегрирането на сензорите в система предлага широк спектър от предимства в областите, в които се прилагат, като по-висока ефективност, подобрена безопасност, спестяване на разходи, по-добър анализ на данните.

Благодарение на развитието на технологиите, развитието на сензорите и сензорните системи е свързано с интеграцията с изкуствен интелект [7], миниатюризация,

безжични сензори [8] и IoT свързаност [9].

Напредъкът в производството на съвременни сензори се определя от разработването на нови материали и сензорни елементи, които се прилагат в сензорната технология.

През последните 10-15 години се провеждат интензивни изследвания за получаване на чувствителни елементи за сензори по зол-гел технология. Тя може да се разглежда като по-нататъшно развитие на керамичните технологии, при което се получава тънък чувствителен слой с наноструктура върху керамична подложка [10].

В настоящата работа е описано оборудването на лаборатория СЗ.1 „Сензори и сензорни системи“ от Центъра за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“ и възможностите за използването му за разработване, изследване и калибриране на сензори и сензорни системи.

ОБОРУДВАНЕ НА ЛАБОРАТОРИЯТА

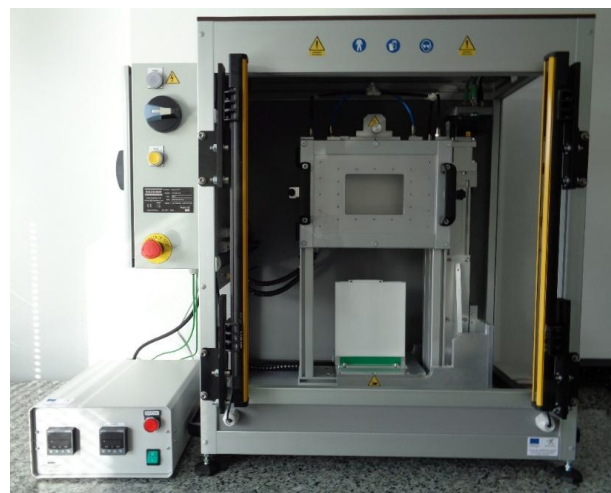
Оборудването в лабораторията може да се раздели на технологично и оборудване за измерване и калибриране.

Технологично оборудване

- Установа за нанасяне на тънки слоеве по зол-гел технология

Установката за нанасяне на тънки слоеве ACEdip 2.0 на фирмата Solgelway се използва за изготвяне на тънки слоеве с помощта на зол-гел технология (фиг.1). Тя е оборудвана с много добра система за задвижване, позволяваща плавно нанасяне на разтвора върху подложката. Затворената сушилна камера може да бъде хомогенно нагрята до 150°C, за да се позволи пълен контрол върху изпарението. Установката се управлява от софтуер, специално проектиран да програмира скоростта, тем-

пературата и промените в атмосферата по време на целия процес.



Фиг. 1. Установа за нанасяне на тънки слоеве по зол-гел технология модел ACEdip 2.0

Основните характеристики на установката са компютърно управление на процеса на нанасяне на слоя, профилиране на скоростта на потапяне и изтегляне, диапазон на скоростта на преместване на контейнера с разтвор – от 0,0005 до 30mm.s⁻¹, контрол на температурата на изсушаване на слоя до 150°C, размер на подложката за нанасяне на слоя до 130x110x5mm, обем на контейнера с разтвора от 15 ml до 235 ml. Предвидени са два контейнера с обеми около 15 ml и 235 ml. Държачът на подложката представлява регулируема челюст с пружина. Комуникационният интерфейс с компютър е USB 2.0. Установката е съоръжена със система за сигурност на базата на крайни изключватели и инфрачервени бариери.

- Лабораторна пещ

Лабораторната пещ е с максимална температура до 1100°C. Разполага със 100 препрограмируеми програми. Скоростта на нагриване е до 100°C/минута. Стартът

на работа може да бъде отложен до 24 часа. Има защита от прекъсване на захранването, защита от изгаряне на термодвойката и защита при отворена врата.

Камерата на пещта е изградена от влакнеста керамика в моноблок, издържаща на извънредно високи температури и шоково охлаждане без повреди. Нагревателните елементи са защитени с кварцови тръби.

- *Електромагнитна бъркалка*

Електромагнитната бъркалка с нагряване е комплектована с държател и температурен сензор Pt1000. Работната ѝ плоча е от неръждаема стомана с керамично покритие, осигуряващо добра химическа устойчивост. LED дисплей показва зададената температура и скорост на разбъркване. Максималният обем на разбъркване е до 3 литра, а скоростта на разбъркване е в диапазона 200...1500 оборота в минута. Температурният диапазон е от +30°C до +280°C със стъпка 1°C. Притежава цифров контрол на температурата и скоростта на разбъркване и индикатор за температурата на работната плоча, когато температурата ѝ е над 50°C, дори ако нагряването е изключено.

Измервателно и калибриращо оборудване

- *Импедансен анализатор MFIA*

MFIA на фирмата Zurich Instruments е цифров импедансен анализатор и прецизен LCR измервател, който работи в честотния диапазон от 1 mHz до 5 MHz (фиг. 2). Той има точност от 0,05% и покрива диапазона на измерване от 1 mΩ до 1 TΩ. MFIA се предлага с потребителски интерфейс LabOne, който включва инструменти както за времевата, така и за честотната област за събиране на данни за импеданса.



Фиг. 2. *Импедансен анализатор модел MFIA на Zurich Instruments*

За разлика от други импедансни анализатори, MFIA измерва директно сигналите на напрежението и тока, без да е необходима конфигурация с балансиран мост. В резултат на това MFIA е способен да измерва при честоти до 1 mHz и да осигурява надеждни измервания на импеданса до 1 TΩ. Освен това той позволява бърз LCR режим, осигуряващ измервания на импеданса значително по-бързи от мостовите инструменти.

Потребителският интерфейс LabOne помага на потребителя да увеличи максимално ефективността на работата. Пълният набор от инструменти, включващ гъвкав параметричен сканиращ инструмент, модул за събиране на данни и плотер, улеснява получаването на съответните параметри на импеданса. Всички функции за измерване са достъпни и на ниво API чрез включените API за C, MATLAB, Python, LabVIEW и .NET. LabOne Compensation Advisor помага на потребителя за елиминиране на всякакви неблагоприятни ефекти, причинени от тестовото му оборудване или окабеляване, за да се постигнат надеждни и точни измервания.

- Калибратор за относителна влажност и температура HygroGen2-S

HygroGen2-S на фирмата Rotronic (фиг. 3) е генератор за контролирана относителна влажност и температура, предимно за използване при калибриране на инструменти за влажност, но е подходящ и за калибриране на температурни инструменти, особено тези за измерване на температура във въздуха. HygroGen2-S имат стандартен диапазон на контрол на температурата от 0°C до 60°C и диапазон на относителната влажност (RH) от 5% до 95%. Тестовата му камера е с обем 2 литра.



Фиг. 3. Калибратор за относителна влажност и температура HygroGen2-S

Типичното време за достигане на зададена точка в диапазона (5-95)% RH е по-малко от 5 минути. HygroGen2-S използва метод на смесен поток за генериране на относителна влажност, необходима на потребителя. Изсушителна клетка осигурява ниска влажност, а пиезоелектричен овлажнител генерира висока влажност. Измерването и контролът се осигуряват от комбинация от сонда ROTRONIC HC2-S, вграден платинен резистивен термометър Pt100 и контролер. Зададените стойности се въвеждат чрез сензорен дисплей на предния панел.

HygroGen2-S създава стабилни условия на температура и влажност, равномерно в рамките на тестовата камера. Тестваните инструменти се поставят в камерата през отвори на вратата. При калибриране показанията им се сравняват с тези на референтен уред. Следи се тяхната работа, така че при необходимост да могат да се направят подходящи корекции.

- Атомен силов микроскоп Flex-Axiom

Flex-Axiom е един от най-универсалните и гъвкави атомно-силови микроскопи, който позволява лесно управление на голямо разнообразие от приложения за изследване на материали (фиг. 4).



Фиг.4. Атомен силов микроскоп FlexAFM на фирмата Nanosurf

Заедно с мощния контролер C3000 се осигурява изследване на сложни характеристики на материалите. Той се характеризира с плоско и линейно сканиране, възможност за сканиране в течности, много режими на измерване, сменяеми канти-

левърни държачи с използване при различни приложения.

Максималните размери на изследвания образец са (100x100) mm, а максималната му височина е 6 mm. Сканиращата глава има възможност за сканиране до 100 μm по осите X и Y и 10 μm по оста Z (височината). Разделителната способност по X-Y е 2 nm, а по Z - 0,2 nm. Поддържа следните режими на работа: режим на статична сила, режим на динамична сила, режим на фазово изобразяване, режим на странична сила, магнитно-силова микроскопия (MFM), електростатична силова микроскопия (EFM).

- Калибратор на инфрачервени термометри

Прецизният инфрачервен калибратор на Fluke 4181 (фиг. 5) е предназначен за калибриране на инфрачервени термометри и термовизионни камери.



Фиг.5. Калибратор на инфрачервени термометри ELCAL на фирмата FLUKE

Той се предлага с акредитирано калибриране от една от най-надеждните лабо-

ратории за калибриране на температура в света. Калибраторът има температурен диапазон от 35°C до 500°C с точност до $\pm 0,35^\circ\text{C}$.

Времето на нагряване от 35°C до 500°C е 20 минути, а времето за охлаждане от 500°C до 35°C е 100 минути. Времето за стабилизиране е 10 минути.

- Калибратор за газове и органични летливи съединения

HovaCAL N SP на фирмата Inspire Analytical Systems (фиг.6) е прецизен генератор на калибровъчен газ, на пари от органични разтворители и газови смеси с ниско съдържание на влага.



Фиг.6. Калибратор за газове и органични летливи съединения HovaCAL N 322-SP

Състои се от захранващ блок с дозиращи устройства за течности и газове и изпарител. Има възможност за генериране на концентрации на SO_2 , NO_x , CO, CO_2 , O_2 , N_2O и други газове и на пари на летливи органични и неорганични съединения и вода. Диапазонът на концентрациите е от 0,1 mg/m^3 до 2000 mg/m^3 . Максималната температура на газова смес е 200°C.

HovaCAL N SP се управлява от компютър чрез софтуера viewCAL N SP. Интуитивен за употреба, той позволява въвежда-

не на общия газов поток, както и на входните и изходните концентрации. Всички данни от измерванията се записват и съхраняват. Освен това могат да се създават и изпълняват зависимости от времето профили на концентрация.

Калибраторът за газове NovaCAL N SP може да се използва за генериране на тестови газове, необходими за тестване на газоанализатори и на газови сензори, когато необходимите тестови газове не са налични в подходяща концентрация.

- Система за измерване на дебелината на тънки слоеве

Системата за измерване на дебелината на тънки слоеве на фирмата Avantes се състои от оптичен спектрометър AvaSpec-ULS2048-USB2, волфрамов халогенен източник на светлина AvaLight-HAL, оптична рефлекторна сонда FCR-7UV2002-ME и платформа за закрепване на рефлекторната сонда (фиг. 7).



Фиг.7. Система за измерване на дебелината на тънки слоеве Avantes

Софтуерът, който управлява системата, е AvaSoft-ThinFilm на Avantes. Може да се измерва дебелината на слоеве оксид върху стъклена подложка, оксид върху силициева подложка и оксид върху подложка от Al_2O_3 в диапазона от 10 nm до 50 μm с резолюция 1 nm.

Дебелината на покритието се определя от интерференцията на бялата светлина, като се преобразува в дебелина чрез математически изчисления.

Освен описаното оборудване, лабораторията разполага още със следната апаратура:

- Термостат

Термостатът JULABO BC6 е с работни температури от +20°C до +150°C. Температурната му стабилност е $\pm 0.03^\circ C$. Настройката на температурата се осъществява от клавиатура на термостата. Притежава USB интерфейс за свързване с компютър.

- Функционален генератор

Функционалният генератор TFG6930A е с максимална честота 30 MHz, двуканален изход, 5 стандартни форми на сигнала и има вграден честотен брояч до 350 MHz.

- Захранващи източници (2 броя)

Триканален захранващ източник модел SK3323. Канал1 и Канал2: 0~32V/0~3.2A; Канал3 (превключваем): 1.8V/2.5V/3.3V/5V, 3.2A.

- Многофункционален процесен калибратор Fluke 725

Fluke 725 е мултифункционален калибратор за процесни сигнали. Той е източник и измервател на различни процесни параметри: ток (mA), напрежение (V, DC), съ-



противление (Ω), честота, съпротивление на RTD и напрежение на термодвойки. На екрана едновременно се визуализират входът и изходът на калибрираното устройство. Предназначен е за калибриране и проверка на процесни трансмитери, температурни сензори и др. Приложим е в лабораторни и полеви условия, където се изисква надеждно, прецизно устройство за измерване и симулация на сигнали.

- *Инфрачервена термокамера*

Инфрачервената термокамера е с резолюция 160x120 пиксела. Топлинният ѝ диапазон е до 500°C, а топлинната чувствителност е по-малка 0,08°C при 30°C.

ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ИЗСЛЕДВАНИЯ С ОБОРУДВАНЕТО

С помощта на оборудването в лабораторията може да се извършва разработване и изследване на различни типове сензори и сензорни системи:

- разработване на сензорни елементи за влажност, газове и температура на базата на оксидни наноструктурни материали, получени по зол-гел технология;
- изследване на параметрите и характеристиките на сензорни елементи за влажност, газове и температура;
- разработване на мултисензорни системи на базата на газови сензори и създаване на системи от типа „електронен нос“;
- разработване и изследване на сензорни системи за различни физични величини и приложения;
- изследвания на материали чрез методите на импедансната спектроскопия;
- изследване на повърхностната морфология на материали и изделия чрез атомна силова микроскопия;
- измерване на дебелината на тънки слоеве.

След акредитиране на лабораторията, с наличното оборудване ще може да се извършва:

- калибриране на влагомери и сензори за влажност за въздушна среда;
- калибриране на газоанализатори и газови сензори;
- калибриране на температурни сензори и термометри;
- калибриране на безконтактни инфрачервени термометри.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описано е оборудването на лаборатория СЗ.1 „Сензори и сензорни системи“ от Центъра за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“. Оборудването е разделено на технологично, измервателно и калибриращо. Представени са основните характеристики на уредите и установките. Разгледани са възможностите за използването им за разработване, изследване и калибриране на сензори и сензорни системи.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

- [1] M. Javaid, A. Haleem, R. P. Singh, S. Rab, R. Suman. Significance of sensors for industry 4.0: Roles, capabilities, and applications. *Sensors International* 2 (2021) 100110



- [2] M. Javaid, A. Haleem, S. Rab, R. P. Singh, R. Suman. Sensors for daily life: A review. *Sensors International* 2 (2021) 100121.
- [3] M. Whaiduzzaman, A. Barros, M. Chanda, S. Barman, T. Sultana, M. S. Rahman, S. Roy, C. Fidge. A Review of Emerging Technologies for IoT-Based Smart Cities. *Sensors* 2022, 22, 9271.
- [4] P. Musa, H. Sugeru, E. P. Wibowo. Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review of NPK Sensor Implementations. *Sensors* 2024, 24, 51.
- [5] A. Ullah, M. H. Zulfiqar, M. A. Khan, M. Zubair, M. Q. Mehmood, Y. Massoud. Fast Response Facile Fabricated IDE-Based Ultrasensitive Humidity Sensor for Medical Applications. *ACS Omega* 2023, 8, 16842-16850.
- [6] M. Majid, S. Habib, A. R. Javed, M. Rizwan, G. Srivastava, T. R. Gadekallu, J. C.-W. Lin. Applications of Wireless Sensor Networks and Internet of Things Frameworks in the Industry Revolution 4.0: A Systematic Literature Review. *Sensors* 2022, 22, 2087.
- [7] Intelligent technologies for sensors: applications, design, and optimization for a smart world/Edited by S. Kannadhasan, R. Nagarajan, A. Karthick. CRC Press. Boca Raton, USA, 2023.
- [8] M. Majid, S. Habib, A. R. Javed, M. Rizwan, G. Srivastava, T. R. Gadekallu, J. C.-W. Lin. Applications of Wireless Sensor Networks and Internet of Things Frameworks in the Industry Revolution 4.0: A Systematic Literature Review. *Sensors* 2022, 22, 2087.
- [9] V. K. Khanna. IoT Sensors. An Exploration of Sensors for Internet of Things. CRC Press. Boca Raton, USA, 2025.
- [10] Handbook of Sol-Gel Science and Technology. Processing, Characterization and Applications / Edited by L. Klein, M. Aparicio, A. Jitianu. Springer, Cham, 2018.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ПРИЛОЖЕНИЕ НА ИНФРАЧЕРВЕНИ МАТРИЧНИ СЕНЗОРИ С НИСКА РАЗДЕЛИТЕЛНА СПОСОБНОСТ ЗА РАЗПОЗНАВАНЕ НА ЧОВЕШКА ДЕЙНОСТ В ПОМЕЩЕНИЯ

APPLICATIONS OF LOW-RESOLUTION IR ARRAY SENSORS FOR INDOOR HUMAN ACTIVITY DETECTION AND RECOGNITION

Galidiya Petrova, Hristo Radev, Dimitar Yankov, Georgi Bodurov

Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract

The present paper provides a review on applications of Low-resolution IR array sensors in Smart Health Care and monitoring systems. The review is focused on two main scenarios: indoor people detecting and localizing; indoor human activity detection and recognition. A comparative analysis of the reported results in the latest research studies has been carried out in terms of the type and position of the low-resolution IR array sensors used, the employed methods and image processing techniques and the achieved accuracy. The analysis shows that for human activity recognition applications, the IR array sensors with 24×32 pixels or multiple sensors arrangements with 4×16 , 16×16 and 24×32 pixels can provide sufficient accuracy and still preserving user privacy.

Keywords: Low-resolution IR array sensors; indoor people detecting and localizing; human activity detection and recognition.

ВЪВЕДЕНИЕ

В съвременните концепции за развитие на Smart City основни направления са Smart Health Care, Smart Home, Smart Grid, Smart Cars и т.н., с принадлежащите им сензори и сензорни мрежи, мрежи за предаване на данни, както и технологии за обработка и съхраняване на големи обеми от данни. Две от основните области на развитие в интелигентните домове, са енергийно ефективни домове и асистирание (подпомагане) на възрастни хора, които са пряко

свързани с направленията Smart Health Care и Smart Grid на интелигентните градове [1]. При тях акцента се поставя върху изграждането на интелигентни мониториращи системи (Smart monitoring systems) с адаптирани сензорни системи за домашно приложение и интегрирането им към съответните под-системи на Smart City. Първите изследвания в областта на интелигентни домове започват в началото на 21 век. С нарастване броя на възрастното население в Европа, все поактуални стават систе-



мите за наблюдение на високорискови пациенти и подпомагане на възрастните хора в домашни условия и при управлението на превозни средства. При проектирането на интелигентните системи за наблюдение на високорискови пациенти и подпомагане на възрастни хора се прилага предимно четирислойната архитектура, като в сензорния слой се използват следните групи сензори:

- Проследяване на здравния статус на обитателите посредством биомедицински сензори (физиологични параметри – честота на сърдечния ритъм, кръвно налягане, кръвна захар, дихателна честота и кислородно насищане).

- Състояние на околната среда (температура, влажност, запрашеност на въздуха, осветеност).

- Състояние на обекти в дома (отворени/затворени врати, включено/ изключено осветление, движение/покой/ активност/ на обитателя).

Освен различни сензорни технологии се използват и различни комуникационни среди за свързване на сензорите в сензорни мрежи в интелигентните домове.

ИНФРАЧЕРВЕНИ МАТРИЧНИ (IR) СЕНЗОРИ С НИСКА РАЗДЕЛИТЕЛНА СПОСОБНОСТ

Видеокамерите позволяват събирането на визуална информация, което е най-прекият и естествен начин за описание на човек, обект, действия и взаимодействия. Видеокамерите позволяват получаването на огромно количество данни за околната среда по ненаатрапчив и лесен начин. Използването на тези устройства в частни пространства обаче, поражда етични опасения, свързани с поверителността и неприкосно-

веността на личния живот на техните обитатели. В този смисъл доверието, поверителността и неприкосновеността на личния живот трябва да бъдат заложени като основни изисквания при проектирането и разработването на видео-базирани решения за домашни грижи [2].

Интелигентният мониторинг позволява предоставянето на услуги за откриване на рискове и подкрепа, които увеличават автономността на хората у дома. Обект на наблюдение са навиците и здравето на потребителя, за да се открият евентуални аномалии. Тези аномалии често са от решаващо значение за ранната диагностика на редица заболявания свързани с когнитивни нарушения [3].

Проблемите с поверителността на широко използваните в мониториращите системи видеокамери са преодолени чрез използването на инфрачервени матрични сензори [4]. Тези сензори са неинвазивни и по-удобни за използване в закрити помещения. IR сензорите измерват топлината, генерирана от човешкото тяло или други обекти, и я визуализират върху IR матрица с ниска резолюция. IR матричните сензори с ниска резолюция обикновено съдържат 8×8, 4×16, 16×16 или 24×32 пиксела. Ниската цена прави тези сензори привлекателни и достъпни за внедряване в много приложения. През последното десетилетие IR сензорите с ниска резолюция, провокират изследователския интерес към няколко сценария за мониторинг в дома [4]. Техните основни предимства са: неинвазивни от гледна точка на поверителността; не могат да правят разлика между отделни лица, като по този начин допълнително запазват поверителността; нечувствителност към



нивото на околното осветление и промените; възможност за работа в пълен мрак; по-добро покритие, поради широкото зрително поле (FOV), което води до по-широка зона на откриване; бързо време за реакция; лесна обработка на изображенията, и лесно позициониране.

Изследванията, свързани с приложението на IR матричните сензори за домашно наблюдение са фокусирани върху: 1. Мониторинг на присъствието на хора в помещения/сгради; 2. Откриване на неподвижно положение или проследяване на движещи се хора в помещение или сграда; 3. Откриване на падания и откриване на възможни аварийни ситуации; 4. Откриване на човешка активност и/или необичайна активност при възрастни хора в тоалетни, бани, съблекални и др.

В тази статия представяме преглед на изследвания и съвременни приложения на инфрачервените матрични сензори с ниска разделителна способност в системите за домашен мониторинг, анализирайки използваните сензори, методи и техники за обработка на изображенията и постигнатата точност при откриване и локализиране на хора, както и откриване и разпознаване на човешки дейности в помещенията. Останалата част от статията е очертана, както следва: В секция 3 са представени модалностите на сензорите, методите, техниките за обработка и подходите за машинно обучение за откриване и локализиране на хора в помещения. Изследването върху откриването и разпознаването на човешка дейност е представено в секция 4. Заключение и насоките за бъдещите изследвания са представени в края на статията.

ПРИЛОЖЕНИЕ НА IR МАТРИЧНИ СЕНЗОРИ ЗА ОТКРИВАНЕ И ЛОКАЛИЗИРАНЕ НА ХОРА

При направеното проучване са намерени редица публикации, които предлагат различни комбинации от методи за отчитане, техники за обработка и подходи за машинно обучение за откриване и локализиране на хора в помещения или сгради, използвайки евтини IR матрични сензори с ниска разделителна способност. Basu и Rowe [5] са разработили метод за оценка на посоката на движение на човек, използвайки алгоритъм с машина за опорни вектори. Trofimova и съавтори [6] използват техника за премахване на шум, базирана на Калман филтъра, за откриване на човешко присъствие в затворена среда. Те съобщават за подобрена точност до 97% при откриване на хора. Mohammadmoradi и съавтори [7], използвайки IR матричен сензор с ниска резолюция и прагово базирана техника, комбинирана с филтриране на температурата, за да оценят потока от хора минаващи през врата, съобщават за постигната средна точност от 93%. В [8] Qu и съавтори предлагат система за локализация и проследяване на хора на закрито, реализирана с IR сензорна матрица, разположена хоризонтално с височина 3,5 м и с Калман филтър. Авторите съобщават, че проектираната адаптивна прагова техника за запазване на хората и премахване на фона работи добре за много хора на закрито. Savazzi и съавтори [9] предлагат Bayesian framework за разпознаване и дискриминиране на движенията на тялото, базирана на анализ на термични сигнатури в реално време. Предложеният подход използва статистически модел за извличане на индуцирани от тялото



термични сигнатури и модел на мобилност за проследяване на движенията на много тела в затворено пространство.

В [10] Singh и Aksanli представят рамка за точно и дискретно откриване на броя на хората в дадена среда и проследяване на техните позиции. Те демонстрират, че внимателният подбор на алгоритъм може да осигури до 100% точност при откриване на присъствието на потребителя. Освен това съобщават, че фиксирането на сензора на тавана на помещението дава най-добри резултати. Те разглеждат проследяването на позицията като статично откриване на активност, при която позицията на потребителя не се променя по време на дейности като сядене, стоене и др. Чрез използване на предварителна обработка на данните, включително нормализиране и преоразмеряване, и методи за машинно обучение, четири статични активности се откриват успешно с точност до 97,5%.

Maaspuro [11] изследва приложение на IR матричен сензор като брояч на хора минаващи през врата, използвайки алгоритъм за проследяване с Калман филтър. Doherty и съавтори [12], въвеждат нова система за локализация на закрито, като комбинират 8×8 IR матричен сензор и методи за машинно обучение (логистична регресия, K-най-близки съседи, машина с поддържащи вектори и невронна мрежа) за събиране и анализ на данни за присъствие на хора в тоалетна. Те съобщават за впечатляваща постигната точност между 98%–99%.

В [13] Bouazizi и Ohtsuki предлагат подход с използване на IR матричен сензор за откриване на присъствие/отсъствие на човек в стая. С широкоъгълен сензор с резолюция (24×32) пиксела и алгоритми за дълбоко обучение, те са в състояние да открият

присъствието или отсъствието на човек със 100% точност и да идентифицират присъствието на до 3 души с точност от 97%. В [14] Perra и съавтори представят подход, който открива човешко присъствие в затворена среда чрез комбиниране на изображението от IR матричен сензор с алгоритъм за разпознаване на образи, базиран на праг с пълзящо средно. Алгоритъмът успява да открие с висока точност ($>95\%$) преминаването на хора с различна скорост на ходене, на различни разстояния от сензора и в температурни диапазони, типични за жилищна среда. Сравнителен анализ на изследвания, използващи IR матрични сензори с ниска разрешаваща способност, за откриване, локализиране и проследяване на хора в помещения, е представен в Таблица 1.

Резултатите показват, че с подходящи техники за обработка на изображенията и използване на IR матричен сензор с резолюция (8×8) пиксела, фиксиран на тавана, може да се постигне висока точност. За предпочитане е, обаче да се използват повече IR матрични сензори с по-широко зрително поле (FOV) и с резолюция (4×16) пиксела или един сензор с по-висока резолюция, от типа (24×32) , за да се постигне точност близка до 100%.

ОТКРИВАНЕ НА ЧОВЕШКА ДЕЙНОСТ С ИЗПОЛЗВАНЕ НА IR МАТРИЧНИ СЕНЗОРИ

Откриването на активност е една от ключовите задачи пред мониториращите системи свързана с детектирането на инциденти с възрастните хора. Целта е да се следи начинът им на живот, за да се разпознае появата на евентуални промени в ежедневните им



навици. Наред с това, чрез ранно разпознаване на поведенчески аномалии могат да се открият ранни признаци на когнитивно увреждане.

Mashiyama и съавтори [15], използвайки метода на машината с опорни вектори, съобщават за постигната точност от 94,7% при откриване и разпознаване на четири човешки дейности, включително падане, с един IR матричен сензор с ниска резолюция (8×8). Karayaneva и съавтори [16] използват три (8×8) IR матрични сензора Panasonic, работещи на честота 10 кадъра в секунда, за да получат набор от изображения, който се състои от различен брой хора, извършващи няколко вида действия (стоене, седене и ходене). Те прилагат няколко различни алгоритъма за класификация директно върху набора от изображения. Представят количествени резултати за различни комбинации от сензорни данни (един сензор, два сензора и общо три сензора) и различни алгоритми за класификация (класификатор с опорни вектори, произволна гора и k-най-близък съсед). Kobayashi и съавтори [17] са предложили система за откриване на активност, използваща два (8×8) IR матрични сензора - единият монтиран на стената, а другият на тавана. За класификацията на различни дейности те използват метода на опорни вектори. Отчетената точност на класификация за всички дейности е над 90%. Комбинацията от данни от два сензора увеличава точността на детектиране на седнало положение от 78% на 93%. В [18] Тао и съавтори, използвайки IR матричен сензор (8×8), монтиран на тавана, са предложили подход за разпознаване на 7 основни човешки ежедневни дейности, базиран на дискретна косинусна трансформация за извличане на ха-

рактеристики. Те докладват точност на разпознаване на 7 ежедневни дейности от 87,5%, с чувствителност на откриване на падане от 100% и специфичност от 99%. Gu и съавтори [19], използвайки (24×32) пиксела IR матричен сензор, са предложили динамична техника за премахване на размит пространственовремеви фон, за да разпознават човешка активност. Те целят първо да премахнат топлинните смущения на фона на инфрачервеното изображение на сензора, тъй като той е сложен и динамично променящ се, а след това да приложат методи за разпознаване на човешки дейности. В [4] Muthukumar и съавтори са предложили техника, базирана на дълбоко обучение, за откриване на активност, използваща два широкоъгълни IR сензора (24×32) пиксела, единият от които е поставен на стената, а другият на тавана. Те класифицират различни дейности, включително „ходене“, „стоене“, „седене“, „лежане“, „падане“ и прехода между дейностите, наречен „промяна на действието“. Точността на тяхната класификация, комбинираща данните от двата сензора, достига 97%.

Сравнителен анализ на изследванията, използващи инфрачервени матрични сензори с ниска резолюция за откриване на човешки дейности в помещения, е представено в Таблица 2. При този сценарий подобри резултати се постигат чрез използване на 2 или 3 IR матрични сензора с подходящо разположение в стаята.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статията представя преглед на приложенията на инфрачервени матрични сензори с ниска резолюция в системи за монито-



ринг в дома и е фокусирана върху два основни сценария: откриване, локализиране и броене на хора в помещения; откриване и разпознаване на човешка активност. За всички сценарии е постижима висока точност (над 95%). Анализът на резултатите от изследванията показва, че използването на няколко IR сензори с ниска резолюция повишава точността, като същевременно се запазва поверителността на потребителя. Когато е необходимо наблюдение в по-широка зона в дома, IR сензори могат да се разположат в решетката на тавана или да се поставят отделно на входа на помещенията или на места определени като критични или потенциално опасни в жилището. Такива са помещения с топлинни източници, например спалнята, ако има поставена отоплителна печка, радиатор, духалка; за детекция на запалена цигара и забравена (или паднала) в леглото и около леглото, което е типична критична ситуация при пушачи; за детектиране на падане в тоалетни, бани, съблекални, където изискването за запазване на поверителност и ненавлизане в личното пространство е водещо; на преходните места – вход на баня/тоалетна, вход на спалнята или входната врата на жилището. Типични примери за опасни ситуации са: забравен включен котлон със/без съд върху него; забравено спиране на водата в кухня/баня.

Бъдещите изследвания са насочени към: Анализ и провеждане на изследвания за определяне на оптималното разположение и необходимата резолюция на всеки от използваните IR матрични сензори за детектиране на критични и опасни ситуации; Създаване на база данни в Sensor Cloud с реални изображения от инфрачервените матрични сензори;

Разработване и изследване на алгоритми за разпознаване, детектиране и категоризиране на опасните ситуации в дома, на база текущо сравняване на сканираните изображения.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

- [1] L. De Silva, Ch. Morikawa, I. M. Petra, “State of the art of smart homes,” Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 25, 7, 2012, pp. 1313-1321, ISSN 0952-1976, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2012.05.002>
- [2] J. R. Padilla-López, A. A. Chaaraoui, F. Gu, and F. Flórez-Revue, “Visual privacy by context: Proposal and evaluation of a levelbased visualisation scheme,” Sensors 2015, 15, 12959-12982; doi:10.3390/s150612959.
- [3] F. Benetazzo et al., “AAL technologies for independent life of elderly people,” Biosystems & Biorobotics, 2015, vol.11, pp. 329-343.
- [4] K. A. Muthukumar, M. Bouazizi, and T. Ohtsuki, “A novel hybrid deep learning model for activity detection using wide-angle lowresolution infrared array sensor,” May 2021 IEEE Access PP(99):1-1, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3084926.



- [5] C.Basu, A. Rowe, “Tracking motion and proxemics using thermal-sensor array,” arXiv 2015, Available online: abs/1511.08166
- [6] A.A.Trofimova, A. Masciadri, F.Veronese, F.Salice, “Indoor human detection based on thermal array sensor data and adaptive background estimation,” J. Comput. Commun. 2017, 5, pp.16–28.
- [7] H. Mohammadmoradi, S. Munir, O. Gnawali, C. Shelton, “Measuring people-flow through doorways using easy-to-install IR array sensors,” In Proceedings of the 2017 13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), Ottawa, ON, Canada, 2017; pp. 35–43.
- [8] D. Qu, B. Yang, N. Gu, “Indoor multiple human targets localization and tracking using thermopile sensor,” Infrared Phys. Technol, 2019, 97, pp. 349–359.
- [9] S. Savazzi, V. Rampa, S. Kianoush, A. Minora, L. Costa, Occupancy pattern recognition with infrared array sensors: A Bayesian approach to multi-body tracking,” ICASSP 2019 - IEEE Int. Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, DOI: 10.1109/ICASSP.2019.8682214
- [10] S. Singh and B. Aksanli, “Non-intrusive presence detection and position tracking for multiple people using low-resolution thermal sensors,” J. Sens. Actuator Netw. 2019, 8, 40; doi:10.3390/jsan8030040
- [11] M. Maaspuro, “A low-resolution IR-array as a doorway occupancy counter in a smart building,” Int. J. Online Biomed.Eng.(iJOE), 2020, 16, doi:10.3991/ijoe.v16i06.13915
- [12] B. Doherty et al., “The shakedown: Developing an indoor-localization system for quantifying toilet usage in offices,” Archit. Sci. Rev. 2020, 63, pp. 325–338.
- [13] M. Bouazizi and T. Ohtsuki, “An infrared array sensor-based method for localizing and counting people for health care and monitoring,” 42nd Annual Int. Conf. of the IEEE Eng. in Medicine and Biology Soc., Montreal, QC, Canada, 2020, pp. 4151-4155.
- [14] Cr. Perra, et al., “Monitoring indoor people presence in buildings using low-cost infrared sensor array in doorways,” Sensors 2021, 21, 4062. <https://doi.org/10.3390/s21124062>.
- [15] S. Mashiyama, J. Hong, and T. Ohtsuki, “Activity recognition using low resolution infrared array sensor,” in Proc. IEEE Int. Conf. on Communications, June 2015, pp. 495–500. [16] Y. Karayaneva, S. Baker, B. Tan, and Y. Jing, “Use of low-resolution infrared pixel array for passive human motion movement and recognition,” Proceedings of British HCI 2018, <http://dx.doi.org/10.14236/ewic/HCI2018.143>
- [17] K. Kobayashi, T. Ohtsuki, K. Toyoda, “Human activity recognition by infrared sensor arrays considering positional relation between user and sensors,” in Proc. Smart City based on the Ambient Intelligence, 2018. [18] L. Tao, et al., “Home activity monitoring using low resolution infrared sensor array,” arXiv18, 2018.
- [19] N. Gu, B. Yang, T. Zhang, “Dynamic fuzzy background removal for indoor human target perception based on thermopile array sensor,” IEEE Sens. J., 2019, 20, pp. 67–76.



ТАБЛИЦА 1. Изследвания, използващи IR матрични сензори с ниска разделителна способност, за откриване и локализиране на хора в помещения

Изследване, година	Резолуция на IR сензор	Методи и техники за обработка на изображенията	Постигната точност	Приложение за
Mashiyama et al., [15], 2015	8 × 8	support vector machine	94.7% с изключение на сядане (78%)	откриване на човешка дейност (спиране, ходене, сядане, падане)
Karayaneva et al. [16], 2018	1, 2, 3 сензора 8 × 8	different classification algorithms (support vector classifier, random for-est and k-nearest-neighbor)	82%-100%	откриване и разпознаване на човешка дейност (стоене, сядане и ходене)
Kobayashi et al., [17], 2018	8 × 8	support vector machine	> 90%	откриване на човешка дейност (спиране, ходене, сядане, падане)
Singh and Aksanli [10], 2019	2 сензора 4 × 16 свързани с 8 × 16	noise removal, background subtraction, extracting multiple regions of interest (RoI), separating each RoI, resizing each RoI, five machine learning algorithms	до 97.5%	проследяване на позицията и откриване на статични дейности (стоене, седене на стол, седене на земята и лежане на земята); на броя на хората в околната среда
Tao et al., [18], 2018	8 × 8	discrete cosine transform for temporal and spatial feature extraction	87.50% за 1 сензор > 93% за 3 сензора	разпознаване на ежедневните човешки дейности (падане, седене неподвижно, преход от седнало в изправено положение, стоене неподвижно, преход от стоене в седнало положение, ходене отляво надясно, ходене отляво наляво)
Gu et al., [19], 2019	24 × 32	remove non-human thermal disturbances in the background	-	разпознаване на човешката активност



ТАБЛИЦА 2. Изследвания, използващи IR матрични сензори с ниска разделителна способност, за откриване на човешки дейности в помещения

Изследване, година	Резолуция на IR сензор	Методи и техники за обработка на изображенията	Постигната точност	Приложение за
Basu and Rowe, [5], 2015	8 × 8	a support vector machine algorithm	80%	Проследяване (на посоката) на движение на човек
Trofimova et al., [6], 2017	8 × 8	noise removal technique based on Kalman filter	Up to 95%	Детектиране на хора
Mohammadmoradi et al., [7], 2017	8 × 8	a threshold-based technique (Otsu's binarization) and temperature filtering technique	93%	Брояч на хора в помещение или човекопоток през врата
Qu et al., [8], 2019	8 × 8	adaptive threshold technique and Kalman filter	-	Локализиране и проследяване на хора
Savazzi et al., [9], 2019	8 × 8 на тавана	Bayesian filtering combined with adaptive background subtraction	97%	проследяване на хора
Singh and Aksanli [10], 2019	3 sensors 4 × 16	window size algorithm and connected component algorithm	100 %	Детектиране на броя на хората в помещение и проследяване на техните позиции
Maaspuro, [11], 2020	8 × 8	Kalman filter tracking algorithm	89% - 92%	Брояч на човекопоток
Doherty et al., [12], 2020	8 × 8	logistic regression, K-Nearest neighbours, support vector machine, and a feedforward neural network	98% - 99%	Присъствие на човек в помещението
Bouazizi and Ohtsuki, [13], 2020	24 × 32	Deep learning algorithms	97% -100%	Човешко присъствие/ отсъствие в помещение
Perra et al. [14], 2021	8 × 8	Pattern recognition algorithm based on moving average threshold	> 95%	Брояч на хора в помещение или човекопоток през врата
Muthukumar et al., [4], 2021	2 сензора 24 × 32	hybrid deep learning classification technique, Convolutional Neural Network (CNN), LSTM	97%	разпознаване на човешка активност (ходене, стоене, седене, лежане, падане)



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

СКАНИРАЩАТА ЕЛЕКТРОННА МИКРОСКОПИЯ – КЛЮЧОВ ФАКТОР ПРИ РАЗРАБОТВАНЕТО НА ИНДУСТРИАЛНИ НАНОТЕХНОЛОГИИ ЗА ПОКРИТИЯ

SCANNING ELECTRON MICROSCOPY – A KEY FACTOR IN THE DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL NANOTECHNOLOGIES FOR COATINGS

Lilyana Kolaklieva^{1,2*}, Vasilliy Chitanov^{1,2}, Stefan Kolchev^{1,2}, Ekaterina Zlatareva^{1,2},
Tetiana Cholakova¹, Denis Faik¹, Roumen Kakanakov¹

¹Central Laboratory of Applied Physics, Bulgarian Academy of Sciences

²Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

*e-mail ohmic@clapbas.bg

Abstract

A range of technologies for deposition of multicomponent coatings based on transition metal nitrides, specifically Ti and Cr, has been developed. The technologies have been optimized in terms of the mechanical and tribological properties of the achieved coatings. The process optimization, which is based on controlling the elemental composition of the coatings using Scanning electron microscopy and Energy-dispersive spectroscopy, is illustrated. As a result, an optimal interrelation between the mechanical and tribological properties of the multicomponent coatings TiAlN, TiCrAlN, CrAlN and CrTiAlN has been developed.

Keywords: Scanning electron microscopy (SEM), Energy-dispersive spectroscopy (EDS), unbalanced magnetron sputtering, nanohardness.

ВЪВЕДЕНИЕ

Дейността на Лаборатория „Индустринанотехнологии“ към Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“ е фокусирана върху разработването на технологии за нови индустриални покрития. Съвременната индустрия е основна област на приложение на покритията, получени чрез PVD (отлагане от газова фаза) метод. С развитието на индустрията непрекъснато нараства необходимостта от нови многофункционални покрития с по-

добри свойства. Тези покрития се използват основно в металообработващата промишленост, автомобилостроенето и самолетостроенето за модифициране на повърхността на детайли и елементи с цел подобряване на повърхностните свойства като твърдост, износоустойчивост, корозионна устойчивост и термична стабилност. Съставът и структурата са определящи за свойствата на покритията. Ето защо изследването им е ключов етап в разработването на технологии за твърди и свръхтвърди покрития.



Сканиращата електронна микроскопия намира широко приложение в индустрията за изследване на морфологията на повърхността и обема на твърди обекти; за анализ на разпределението на съставлящите ги химични елементи, за разграничаване на различните фази; за изследване и определяне на микроструктурата на веществата. Тези нейни възможности я правят важен етап при разработването на нанотехнологии за нови твърди покрития за индустриални приложения.

Настоящата статия представя ролята на Сканиращата електронна микроскопия при разработването в Лаборатория „Индустриални нанотехнологии“ на нанотехнологии за нанасяне многокомпонентни и многослойни твърди покрития.

ИЗЛОЖЕНИЕ

При разработването на технологиите за нанасяне на покрития от съществено значение е да се оптимизират съотношенията между съставлящите ги елементи. Атомите на различните елементи се враждат по различен начин в кристалните решетки, имат различен афинитет към реактивния газ, което води до различни скорости на нанасяне. Тази специфика на материалите определя различни структура, процес на израстване на слоевете, морфология на повърхността и плътност, фактори, които влияят върху механичните и трибологични свойства.

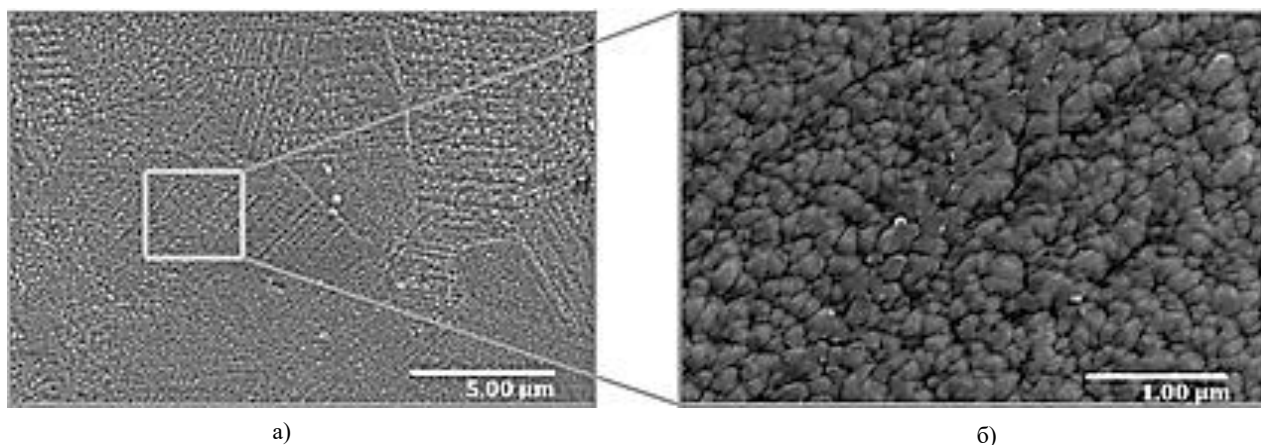
Разработените нанотехнологии се базират на метода на разбалансирано магнетронно разпръскване в затворено магнитно поле. За целта е използвано вакуумно оборудване UDP 850 с четири правоъгълни магнетрона на английската фирма Teer Coatings Ltd. Използваният метод позволява нанасянето на покрития с минимизирана грапавост и много добра повторимост на механичните и трибологични свойства.

Оптимизацията на структурата и състава на покритията, е извършена чрез оптимизация на технологичните параметри като ток на катодите, базово напрежение върху подложките, съотношение инертен газ /реактивен газ, работно налягане. Оптимизацията на всяка технология се извършва на база изследването на два основни параметъра на покритията, структура и състав чрез сканираща електронна микроспектроскопия (SEM) и енергийно-дисперсионна спектроскопия (EDS) и нанотвърдост, определяна чрез наноиндентирание.

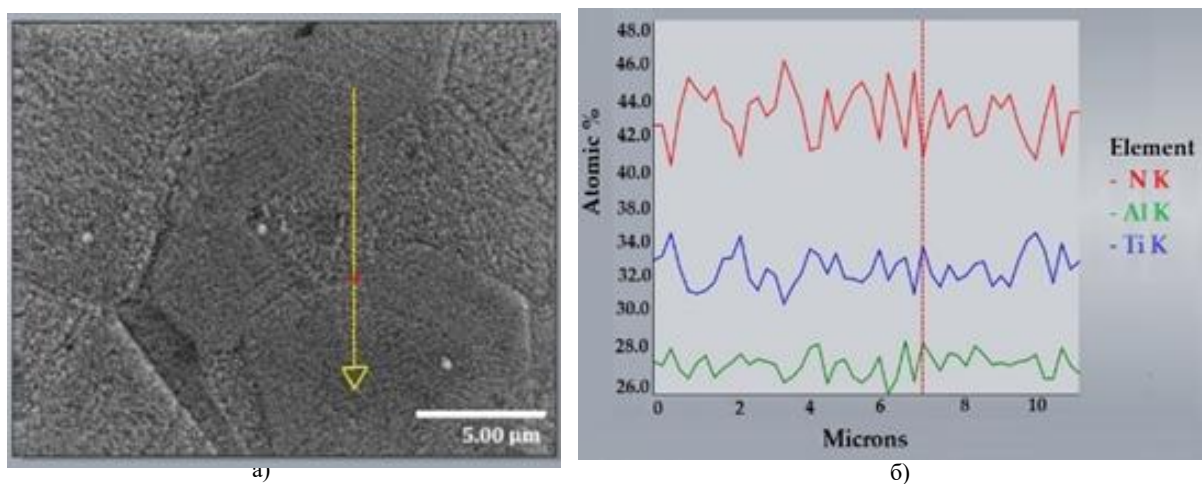
Разработените технологии се обобщават в два класа в зависимост от преобладаващия преходен метал, титан или хром, което се определя от тяхното предназначение.

1. Многокомпонентни покрития $TiAlN$ и $TiCrAlN$.

Трикомпонентното покритие $TiAlN$ е подходящо за нанасяне върху матрици, поансони и щамповачи инструменти за лезерската промишленост, тъй като съдържанието на алуминий повишава твърдостта на повърхността на инструментите върху които е нанесено [1]. След оптимизация на технологичните параметри е постигната, плътна структура на морфологията на повърхността, характеризираща се със зърниста матрица, като в отделни области зърната се сливат в по-големи и компактни структури (Фиг. 1). Постигнатата грапавост на повърхността (~ 70 nm) допринася за подобряване на механичните и трибологични свойства на покритието. В резултат на оптимизацията на морфологията (Фиг. 1) и състава, твърдостта на покритието $TiAlN$ е подобрена от 20.5 GPa на 32.4 GPa. Линеино EDS сканиране установи, че 18% увеличение на твърдостта е постигнато при оптимален елементен състав: N – 42 at. %, Al – 26 at. % и Ti – 32 at. % (Фиг. 2).



Фиг. 1. Морфология на повърхността на TiAlN покритие при увеличение 6k (а) и 30k (б).



Фиг. 2. Резултати от EDS изследване на състава на TiAlN покритие: а) морфология на повърхността с направление на EDS сканиране; б) спектър на елементите по посока на сканирането.

Таблица 1. Нанотвърдост и коефициент на триене на покритие TiCrAlN в зависимост от елементния състав.

Sample	Element composition, [at. %]				Coefficient of friction, μ	Nanohardness, H [GPa]
	Ti	Cr	Al	N		
# 03	23.7	21.60	17.2	37.5	0.15	32.4
# 04	14.55	34.15	6.55	44.75	0.13	25.4
# 01	25.5	39.20	8.1	27.2	0.30	20.5
# 02	28.3	41.70	8.2	21.8	0.30	21.5



С цел подобряване на трибологичните и адхезионните свойства на покритието TiAlN, на негова основа е разработена технология за добавяне на Cr към състава му [2]. В процеса на оптимизация съдържанието на хром се мени в интервала 21.60 at. % - 41.70 at. % (Табл. 1).

Резултатите от това изследване, показва, че няма еднозначна зависимост на трибологичните и механични свойства на покритието от съдържанието на хром. С увеличаване на съдържанието на хром, коефициентът на триене намалява, но също така намалява и твърдостта. Установено беше, че оптимално съчетание от максимална натовърдост 32.4 GPa с малък коефициент на триене срещу диамантен индентор 0.15 е постигната при съдържание на хром в състава 21.60 at. %.

2. Многокомпонентни покрития CrAlN и CrTiAlN.

Комбинирането на двата метала хром и алуминий в покритието CrAlN подобрява съществено неговите механични и трибологични свойства в сравнение с тези на бинарните CrN и AlN [3]. То се отличава с малък коефициент на триене, добра износостойчивост и термостабилност до

Таблица 2. Технологични параметри при оптимизацията на покритията CrAlN и CrTiAlN.

Coating	ICr [A]	ITi [A]	IAl [A]	N ₂ [sccm]	T [°C]
CrN	6	0.5	0.5	25	148
CrAlN	4	0.5	8	20	128
CrTiAlN-1	6	8	3	32	169
CrTiAlN-2	5	8	3	28	165
CrTiAlN-3	4	8	8	21	148

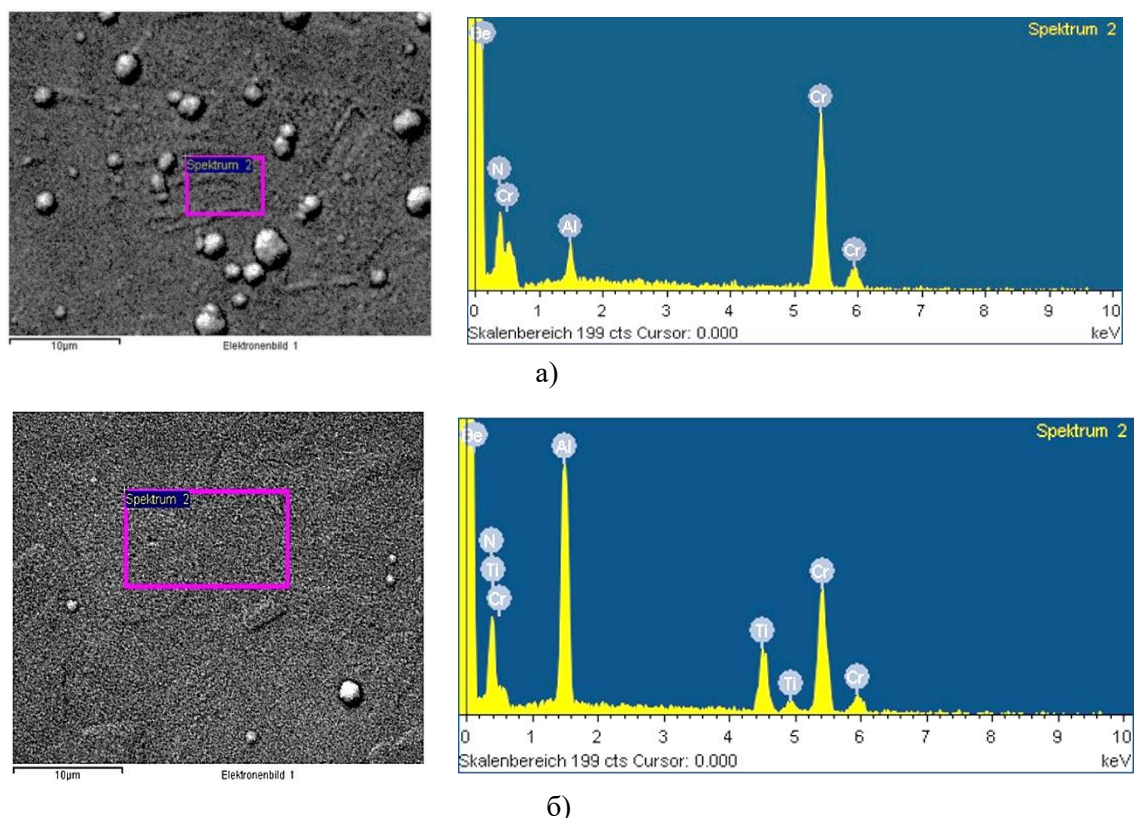
1000 °C, което го прави подходящо за сухо машинно обработване. Подходящо е за насяне върху инструменти за фрезование и пробиване. Добавянето на титан в състава на покритието CrTiAlN повишава температурната му устойчивост до 1100 °C, подобрява оксидационната стабилност и устойчивостта при високи скорости и големи

натоварвания. Оптимизацията на разработените технологии е постигната чрез вариране на технологичните параметри, ток на катодите, поток на реактивния газ, температура на подложката, които както беше споменато, влияят върху морфологията, структурата и елементния състав на покритията, а по този начин и върху техните свойства. Таблицы 2 и 3 илюстрират процеса на разработване и оптимизация на технологиите за нанасяне на покритията CrAlN и CrTiAlN. Вижда се, че промяната на всеки параметър променя състоянието на плазмата, в резултат на което варира елементният състав на покритието. Така например, покритията CrTiAlN-1 и CrTiAlN-2 са нанесени при различни стойности на тока на хромния катод без да се променят токовете на титановия и алуминиевия катоди. Това води до промяна не само на съдържанието на хром в състава на покритието, но и на титан и алуминий. Получените резултати илюстрират, комплексния характер на оптимизацията на технологичния процес, при който трябва да се отчете влиянието на всеки

Таблица 3. Елементен състав на покритията CrAlN и CrTiAlN, получени при технологичните параметри от Табл. 2.

Coating	Element, at. %			
	Cr	Ti	Al	N
CrN	33.5	-	-	66.5
CrAlN	48.8	-	3.9	47.3
CrTiAlN-1	56.6	3.0	3.8	36.6
CrTiAlN-2	48.5	6.9	6.7	37.9
CrTiAlN-3	22.3	7.6	19.1	51.0

технологичен фактор. Промяната на елементния състав на покритията влияе на тяхната морфология и чрез нея на трибологичните им свойства. Фиг. 3 представя повърхността на оптимизираните покрития CrAlN и CrTiAlN, и измерените EDS спектри.



Фиг. 3. Морфология на повърхността и EDS спектър от маркираната област на хромни покрития: а) CrAlN и б) CrTiAlN.

Морфологията на повърхността на покритието CrAlN се характеризира с плътна зърнеста структура като се забелязват агломерати, характерни за повърхности, съдържащи алуминий (Фиг. 3а). В резултат от инкорпорирането на титан в състава на покритието CrTiAlN размерът на зърната намалява съществено. Също така намаляват размерът и количеството агломерати (Фиг. 3б). Този ефект води до увеличаване на твърдостта на покритието. Изследването на нанотвърдостта на оптимизираните покрития установи 13 % увеличение след добавяне на титан, от 21 GPa за CrAlN на 23.8 GPa за CrTiAlN [3]. Тази твърдост е постигната при елементен състав Cr - 48.8 at. %, Al - 3.9 at. %, N - 47.3 at. % на покритието CrAlN и Cr - 22.3 at. %, Ti - 7.6

at. %, Al - 19.1 at. %, N - 51.0 at. % на покритието CrTiAlN.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представените резултати илюстрират изключителната роля на SEM/EDS анализите за разработване на нови покрития с определени свойства и за оптимизирането на технологиите за тяхното нанасяне. За да се отговори на високите изисквания при разработването на индустриални нанотехнологии за нанасяне на иновативни покрития, при стартирането на проекта, в Център за компетентност, в Лаборатория „Индустриални нанотехнологии“ беше закупена специализирана апаратура – сканиращ електронен микроскоп Hitachi S5000 и оборудване за изготвяне на напречно сечение Hitachi IM 4000 (Фиг. 4).



Иновативният Сканиращ електронен микроскоп (SEM) с Шотки емисионен катод (FE) е предназначен за изследване на морфологията, структурата и състава на проводящи и непроводящи обемни материали и слоеве. Използването на FE (field emission) катод като източник на сканиращи електрони дава възможност за изследвания в областта на нано-скалата с резолюция 1.5 nm при 30 kV и ток на пробата >200 nA.

Комбинацията на детектор за вторични електрони (SED) и детектор за обратно разсеяни електрони (BSD) позволява получаването на детайлно топографско изображение на изследвания обект. Чрез вградения електронно-дисперсионен (EDS) спектрометър се извършва елементарен анализ на състава на изследвания материал.

Освен за повърхностен анализ оборудването се използва и за обемен анализ на структура и състав след изготвяне на напречно сечение чрез системата за йонно ецване IM 4000.



Фиг. 4. Фотографии на оборудването
SEM Hitachi S5000 и IM4000.

SEM/EDS изследванията са приложими за:

- Изследване на иновативни материали, разработвани в научно-изследователската дейност.
- Характеризиране на материали от различни области на индустрията: микро- и наноелектроника, електро-техника, машиностроене, автомобилостроене, самолетостроене и др.
- Характеризиране на материали за медицината и стоматологията.
- Характеризиране на артефакти.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

- [1] E. Zlatareva, V. Chitanov, L. Kolaklieva, S. Kolchev, T. Cholakova, C. Pashinski, T. Hribar, M. Cekada, R. Kakanakov, *Development and Research of a Graded TiAlN Hard Coating*, 26.08.2024-30.08.2024г. 23 ISCMP, 23rd International School on Condensed Matter Physics.
- [2] V Chitanov, St Kolchev, T Cholakova, L Kolaklieva, R Kakanakov, Ch Pashinski and N Hristeva, *Low temperature quaternary hard coatings with Cr- to Ti-based transition composition*, Journal of Physics: Conference Series 2240 (2022) 012014. doi:10.1088/1742-6596/2240/1/012014
- [3] V. Chitanov, L. Kolaklieva, R. Kakanakov, T. Cholakova, C. Pashinski, S. Kolchev, E. Zlatareva, G. Atanasova, A. Tsanev and K. Hinger, *Investigation of Optical Properties of Complex Cr-Based Hard Coatings Deposited through Unbalanced Magnetron Sputtering Intended for Real Industrial Applications*, Coatings 2024, 14, 946.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ЕВОЛЮЦИЯ НА ЕЛЕКТРОМОБИЛНОСТТА

EVOLUTION OF ELECTROMOBILITY

Raycho Ilarionov

Technical University of Gabrovo

Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Ivan Simeonov

Technical University of Gabrovo

Hristo Kilifarev

Technical University of Gabrovo

Egnar Özdikililer

Technical University of Gabrovo

Borislav Nedev

Technical University of Gabrovo

Abstract

This report briefly traces the evolutionary development of electromobility. It presents key technological breakthroughs and challenges that have helped to reach the current state and development of electric vehicles. It also outlines some of the results achieved in the previous phase of the project.

Keywords: electric vehicles; vehicle technologies; energy storage; rechargeable batteries; clean energy; history.

ВЪВЕДЕНИЕ

На двигателя се гледа като на машина, която в зависимост от енергията, която го задвижва, определя и вида на автомобила – парен, електрически, бензинов, газов, водороден и т.н.

Електромобилността - използването на електрическа енергия за задвижване на моторни превозни средства - не е ново явление. Тя се заражда в първата половина на 19 век, като първите прототипи се появяват още през 1835 година, но те губят популярност заради ниската цена и масовото производство на автомобили с вътрешно горене., но само през последните десетилетия се превръща в ключов елемент на устойчивия транспорт, в отговор на клима-

тичните промени, замърсяването на въздуха и зависимостта от изкопаеми горива. Едва след 2008 година, с покачването на цените на горивата и нарастващите климатични проблеми, електромобилите отново набират популярност сред масовия потребител. Именно пробивът в технологията на батериите направи електрическите автомобили опция за бъдеща мобилност.

В този доклад се разглеждат историческите корени на електромобилите, основните технологични пробиви и предизвикателства, които са преодоляни, както и текущото състояние и бъдеще на електромобилността.

ИЗЛОЖЕНИЕ

А) Исторически сведения и развитие

1. Първи идеи и прототипи (1820–1860-те)

- Янош Джедик (Ányos Jedlik, Унгария) създава около 1828 г. малък електрически двигател и модел на превозно средство [2].

- Робърт Андерсън (Robert Anderson, Великобритания) между около 1832–1839 г. създава груба прототипна електрическа каляска (фиг. 1), използваща не презареждащи се клетки [2].

2. Поява на презареждащи се батерии и първи практически електромобили (1859–1890-те)

- През 1859 г. френският физик Гастон Планте (Gaston Planté) изобретява първата оловно-киселинна презареждаща се батерия (оловен акумулатор), която предлага жизнеспособен начин за съхранение на електричество на борда на превозно средство [2].

- През 1881 г. друг френски учен Камийл Алфонс Фор (Camille Alphonse Faure) значително подобрява конструкцията на оловната батерия и увеличава нейния капацитет [2].



Фиг. 1. Прототипна електрическа каляска [2]

- Густав Трове (Gustave Trouvé) представя триколка, задвижвана от електрически мотор с батерия на Международната електрическа изложба в Париж през 1881 г. [2].

- През 1888 г. се появява Flocken Elektrowagen, считан за първия серийно произвеждан електромобил (от фирма in Германия) [2].

3. Ранен 20 век: конкуренция с двигателите с вътрешно горене

- В началото на 1900-те електромобилите са популярни в градски условия: таксита, къси маршрути, тиха работа, по-малко замърсяване, липса на вибрации и др. [2,3].

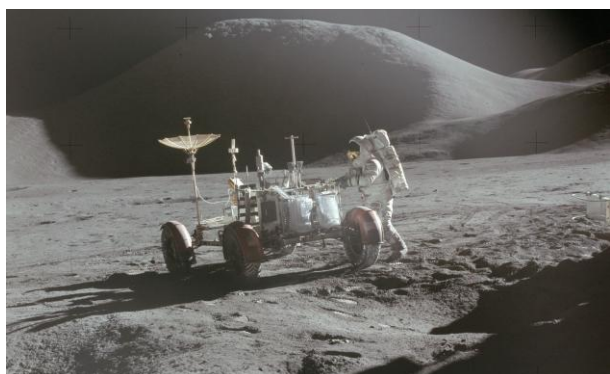
- С развитието на пътната инфраструктура, откриването и експлоатацията на нефтени залежи и производството на поевтини бензинови автомобили (например Model T на Ford, 1908 г.), електромобилите губят преимущество [2].

4. Средна и втора половина на 20 век: забравя и възраждане

- След Първата световна война и през следващите десетилетия електромобилите почти изчезват от пазара за леки коли, остават основно за специални приложения или в по-малки серии.

- През 1960–1970-те: кризи в цените на петрола, екологични проблеми, загриженост за замърсяването - тези фактори възбуждат нов интерес към електромобилите. Например, концептуални модели, експерименти с батерии, малки серийни проби [2].

- През 1971 г. NASA спомага за повишаване на популярността на електрическите превозни средства. Лунният роувър (фиг. 2) – първото пилотирано превозно средство, пътувало по Луната – е захранван с електричество [2,3].



Фиг. 2. Електрически лунен автомобил (Lunar Roving Vehicle) [3]

- През 1970 г. Майкъл Стенли Уитингам (Michael Stanley Whittingham) създава първата презареждаща се литиево-йонна батерия, базирана на катод от титаниев дисулфид и литиево-алуминиев анод, въпреки че тя е страдала от проблеми с безопасността и никога не е била комерсиализирана. Джон Гуденъф (John Goodenough) разширява тази работа през 1980 г., като използва литиево-кобалтов оксид като катод. Първият прототип на съвременната литиево-йонна батерия, която използва въглероден анод, а не литиев метал, е разработен от Акира Йошино (Akira Yoshino) през 1985 г. и е комерсиализиран от екип на Sony и Asahi Kasei, ръководен от Йошио Ниши (Yoshio Nishi), през 1991 г. Комерсиализацията на литиево-йонните батерии доведе до разработването на електрически превозни средства, способни да пътуват на по-дълги разстояния.

5. Новото хилядолетие: модерни електромобили и технологични пробиви

- EV-1 на General Motors (средата до края на 1990-те) - един от първите модерни серийни електромобили към края на 20 век.

- През 2008 г. Tesla пуска Roadster, първият електромобил в съвременната ера с акумулатори тип литий-йон и значителен реален пробег [2,3].

- Nissan Leaf (около 2010) - масов електромобил, нулеви емисии на място, достъпен за широк кръг потребители [2].

6. Текущо състояние и тенденции

- Продажбите на електромобили рязко растат от 2010-та насам; през 2016 г. са произведени 1 милион чисто електрически коли [2].

- Намаляване на цените на литиево-йонните батерии, подобряване на плътността на енергия, удължаване на пробега, бързо зареждане, инфраструктура от зарядни станции.

- Съществува тенденция да се извършва конвертиране на автомобили с двигатели с вътрешно горене (ДВГ) към електромобил или хибриден такъв.

Б) Ключови етапи на развитие

- Изобретяване на електрически двигател и първи прототипи.

- Поява на презареждащи се батерии (оловни) и подобрения в капацитета.

- Конкуренция на електромобили с автомобили с двигатели с вътрешно горене (ICE, Internal Combustion Engine): откриване на нефт, евтин бензин, масово производство.

- Възраждане заради кризи, екологични регулации, нови материали и технологии.

Масови електромобили, бързи зарядни мрежи, политика и маркетинг.

В) История на развитието от предишен етап на проекта

Извършена е научно-приложна работа върху високоефективни технически решения за предотвратяване на претоварването на електрическата мрежа в „пиковите часове“ на зареждане на електрическите превозни средства. Направен е анализ, относ-



Таблица 1. Основни технологични проблеми и как са били решавани

Проблем	Трудности	Решения / Пробиви
Батерии: ниска плътност на енергия, тежест, цена, живот	В началото – оловни акумулатори с малък капацитет и голямо тегло; нужда от рядка замяна и дълго зареждане	Подобрения: по-добри оловни конструкции (Camille Faure), по-късно никел-метал-хидрид, а после литий-йонни батерии, които осигуряват значително по-голям пробег и по-добра енерго-ефективност.
Зареждане и инфраструктура	Липса на зарядни станции, електрическата мрежа не винаги поддържа нуждите, време за зареждане дълго	Развитие на бързи зарядни станции, стандартизация, мрежови инвестиции, интеграция на интелигентни мрежи (“smart grids”) и възобновяема енергия.
Цена и производствени мащаби	Ръчни/ограничени производства, високи цени на материалите, скъпи двигатели и управляваща електроника	Масово производство (Tesla, Nissan Leaf и др.), технологична оптимизация, намаляване разходите за батерии, индустриални мащаби, субсидии и държавни политики за насърчване.
Пробег и ефективност	Електромобилите може да изминават само кратки разстояния, особено при студено време или с тежки товари	Подобрени батерии, аеродинамика, управление на температурата, по-добри двигатели, регенеративно спиране, оптимизация на софтуера и енергийните потоци.
Екологичен и социален отпечатък	Произвеждане на батерии, суровини (литий, кобалт и др.), работа с извличането, рециклиране, въздействие върху екосистемите	Акцент върху рециклиране на батерии, развитие на нови акумулаторни технологии с по-малко дефицитни материали, подобряване на добивните практики, регулации, еко-сертификати.
Публично приемане / поведение	Безопасност, доверие, инфраструктура, страх от „зареждане“, недостатъчна информация	Образователни кампании, стимули (данъчни облекчения, субсидии), показни проекти, публични зарядни мрежи, демонстрация на икономията и ползите.

но проектирането и разположението на зарядните станции, отчитащ всички параметри на електропреносната мрежа. Допълнително са създадени алгоритми и методологии за проектиране на системи за съхранение на електрическа енергия. Те съдържат и съображения за избор и начин на свързване на електронните компоненти и подсистеми при изграждане на системите за съхранение на енергия с цел постигане на най-добри технически и експлоатационни показатели.

Извършени са изследвания в областта на пасивните компоненти (магнитни компоненти и кондензатори) с което се намаляват ограниченията за постигане на големи инсталирани мощности на блоко-

вете на системите за съхранение създадени от конструктивните ограничения на съществуващата елементна база.

Разработен е алгоритъм и реализиран при конверсия на автомобил с двигател с вътрешно горене (ДВГ) към електромобил – избор на елементи и съответно програмно осигуряване. Електромобилът Опел Корса е регистриран и е на разположение към „Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

Развитието на проекта продължава в съответствие с предвидените задачи по работен пакет в Лаборатория С7.1 „Методи и средства за решаване на енергийни и инфраструктурни проблеми, свързани с масо-



вата електромобилност“ (Laboratory C7.1 „Methods and means for solving energy and infrastructure problems related to the mass electro-mobility“).

Характерно за всички акумулаторни батерии е, че след определен период на експлоатация, техните показатели се влошават. Това налага подмяната им с нови акумулаторни батерии. Ако батерията е сравнително евтина, но се налага честа подмяна с нова, или подмяната с нова батерия представлява значителен разход на средства, или ако батериите са голям брой - това е икономически неизгодно. Тогава е добре да се предприемат мерки за удължаване срока на експлоатация на акумулаторните батерии чрез подходяща поддръжка, а при необходимост – възстановяване (съживяване) на батерии с влошени показатели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Еволюцията на електромобилността е сложен процес, белязан от множество научни и технически пробиви, икономически и социални фактори. От началните прототипи през 19 век до днес, електромобилите преминаха през фази на ентузиазъм, спад, рестарт и ускорен растеж. Основните проблеми — батерии (пробег, цена, живот), зарядна инфраструктура, екологични и социални аспекти — са също така тези, които определят бъдещето на еволюцията.

В момента електромобилността е не само технологичен избор, но и стратегически компонент на политиките за устойчиво

развитие и намаляване на емисиите. Бъдещето вероятно ще донесе по-нататъшни иновации в акумулаторните технологии (например твърдо състояние батерии), по-добра интеграция със слънчева/вятърна енергия, усъвършенствани системи за управление на енергията, както и по-широко разпространение на зарядни мрежи и услуги.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Rebecca Matulka. The History of the Electric Car, U.S. Department of Energy, September 15, 2014, <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>, (5.09.2025)
- [2] Energy Saving Trust, A brief history of the electric car, 7 February 2025, <https://energysavingtrust.org.uk/a-brief-history-of-the-electric-car>, (5.09.2025)
- [3] Kevin A. Wilson. Car and Driver. First Electric Car: A Brief History of the EV, 1830 to Present, Jun 15, 2025, <https://www.caranddriver.com/features/g43480930/history-of-electric-cars>, (5.09.2025)



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ПРЕДВИДЕНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ ПО РАБОТЕН ПАКЕТ C7.1 МЕТОДИ И СРЕДСТВА ЗА РЕШАВАНЕ НА ЕНЕРГИЙНИ И ИНФРАСТРУКТУРНИ ПРОБЛЕМИ СВЪРЗАНИ С МАСОВАТА ЕЛЕКТРОМОБИЛНОСТ

PLANNED RESEARCH UNDER WORK PACKAGE C7.1 METHODS AND MEANS FOR SOLVING ENERGY AND INFRASTRUCTURE PROBLEMS RELATED TO THE MASS ELECTRO-MOBILITY

Raycho Ilarionov

Technical University of Gabrovo

Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Ivan Simeonov

Technical University of Gabrovo

Hristo Kilifarev

Technical University of Gabrovo

Egnar Özdikililer

Technical University of Gabrovo

Borislav Nedev

Technical University of Gabrovo

Abstract

In recent years, the European Commission has made serious efforts to decarbonize the countries of the European Union and the world as a whole. To this end, the Green Deal was brought forward as a priority that must be followed by all member states. Transport and the people associated with it must offer solutions to meet the requirements for decarbonization. This means that politicians, researchers, employers, representatives of non-governmental organizations and society as a whole cooperate together. Based on all this, decisions have been made between stakeholders related to decarbonized transport, as well as in mass electromobility, in which batteries play an important role, as well as, as an alternative, batteries based on supercapacitor elements and all the problems associated with them. 3 main sections and tasks for each of them have been formed, which are to be implemented in the coming years.

Keywords: decarbonization; electric vehicle (EV); rechargeable battery; project tasks; ecology; electrical infrastructure; electro-mobility.

ВЪВЕДЕНИЕ

За да се осигури високо ефективна научно-приложна работа за разработване на методи и средства за решаване на енергийни и инфраструктурни проблеми свързани с масовата електромобилност в лаборатория С 7.1, е необходимо да се направи оценка на задачите по проекта от гледна

точка на тяхното бъдещо осъществяване и реализация в предложения работен пакет.

По своята същност темата е актуална от съвременна гледна точка, тъй като е свързана с научно-приложна работа върху високоефективни технически решения и изследвания в енергийния и транспортния сектор, акцентиращи върху различни об-



ласти на екологията, опазването на природата и екологичното образование.

Целта е да се опише решението на всяка от предвидените в работния пакет задача и да се направи кратка, предварителна бъдеща оценка, т.е. по какъв начин работният колектив ще се справи, изправен пред важни предизвикателства през следващото десетилетие. Декарбонизацията и намаляването на замърсяването вече са задължителни и нови технологии и решения трябва да се внедрят, за да се постигнат амбициозните цели, определени от международното законодателство. Електрическата мобилност представлява решаваща възможност за по-устойчив транспорт и неговото оптимално управление на зареждането може да генерират съответните ползи и за енергийния сектор.

Времевият период за решаването на тези проблеми, предвиден в работната програма е с продължителност до 2027 година.

ИЗЛОЖЕНИЕ

А) Текущо състояние на изследванията

Енергийният и транспортният сектор ще бъдат изправени пред важни предизвикателства през следващото десетилетие. Декарбонизацията и намаляването на замърсяването вече са задължителни и нови технологии и решения трябва да се внедрят, за да се постигнат амбициозните цели, определени от международното законодателство. Електрическата мобилност представлява решаваща възможност за по-устойчив транспорт и неговото оптимално управление на зареждането може да генерират съответните ползи и за енергийния сектор. В тази връзка за по-успешната работа по настоящия проект е необходимо да бъде взета информацията според доклад „CEER Report Electric Vehicles: Network Management and Consumer Protection“ [2],

като броят на обществените зарядни точки, необходими в ЕС до 2030 г., ще надхвърли 2 милиона в сравнение с днешните приблизително 510 000. Съгласно информацията в доклада в България има 1100 броя публично достъпни точки за зареждане.

Като се има предвид очакваното въздействие на електрическата мобилност върху мрежата, е важно да се предприемат активни мерки и да се смекчат потенциалните отрицателни въздействия чрез оптимизиране на локализирането/разполагането на инфраструктурата за зареждане на електрически превозни средства. Това ще помогне да се сведе до минимум необходимостта от допълнителни инвестиции в мрежата и да се гарантира ефективността на интелигентните стимули за зареждане.

Този процес на масова електромобилност ще се извърши постепенно във времето като голям дял от него ще се пада на конвертирането на превозни средства от двигатели с вътрешно горене (ДВГ) към електромобили – такива, които са изцяло с електрическо задвижване и хибридни, при които се има съвместяване на електрическо задвижване и ДВГ.

Важен дял в масовата електромобилност са акумулаторните батерии и всички проблеми, свързани с тях като се започне от тяхното производство, съхранение, вграждане в консуматори, зареждане и разреждане в периода на експлоатация при различни условия и натоварвания, рециклиране. Интерес представляват съществуващите технологии за производство, базирано на различни материали и електрохимични процеси, поради които батериите имат различни характеристики и параметри, които трябва да се вземат предвид при използването им. Разновидност при производството на акумулаторни батерии е тази, базирана на суперкондензаторни елементи. Последните имат интересни характеристики (например зареждане за много кратко



време в сравнение с останалите видове батерии), поради които са приложими като алтернативни акумулаторни батерии при електромобилите.

Във връзка със задачите по настоящия проект внимание се отделя и на подсистемите в електромобилите, които постоянно се развиват и усъвършенстват, като основно внимание се отделя на тяхното текущо състояние и непрекъснатото им развитие.

Б) Основни изследователски проблеми и предизвикателства за решаване

Създаване на инфраструктура за разположение на зарядни станции за зареждане на автомобили, автобуси, влакове и други с цел използване на наличния електрически ресурс, осигуряван от електроразпределителните дружества и оптимално натоварване на електрическата мрежа без да се получи дефицит за останалите консуматори.

На базата на проведени изследвания се прави анализ за община и електроразпределителните дружества за оптимизиране на енергийната система по отношение за консумирана и предоставена мощност, свързана със захранването на електрическите возила.

Разглеждане на по-големи електрически возила като автобуси, влакове и други от страна на техния пробег и необходимостта от създаване на мрежа от зарядни станции, за да се осъществи тяхната дейност. Съобразяване на трафика с времето за заряд и последователно натоварване на мрежата.

Използване на енергийната мощност на електрическите возила за покриване на консумацията на други консуматори, които могат да бъдат в бита и потреблението, когато те не са свързани в електрическата мрежа и представляват локален енергиен

източник, осигуряващ необходимата мощност. Така например те могат да бъдат използвани и в селищни и квартални структури за осигуряване на необходимия капацитет за други консуматори, когато електрическото превозно средство е пасивно или по време на движение, когато може да се покрие необходимата електрическа мощност.

Процесът на масова електромобилност ще се извърши постепенно във времето като голям дял от него ще се пада на конвертирането на превозни средства от двигатели с вътрешно горене (ДВГ) към електромобили – такива, които са изцяло с електрическо задвижване и хибридни, при които има съвместяване на електрическо задвижване и ДВГ. При конверсия на автомобил с ДВГ към електромобил, конвертираният електромобил трябва да запази оригиналните функции или част от тях, а така също да се добавят и нови такива, в съответствие с функционалността на електромобила, към който се стремим. Нужно е решаването на проблеми, свързани с подходящ избор на функциите, които трябва да има конвертирания електромобил, контролерите и софтуера за управление на автомобила, информацията, която се чете от сензорите на автомобила, избор на подходящ електродвигател, акумулаторни батерии, потребителски интерфейс и други.

Важен дял в масовата електромобилност са акумулаторните батерии и всички проблеми, свързани с тях като се започне от тяхното производство, съхранение, вграждане в консуматори, зареждане и разреждане в периода на експлоатация при различни условия и натоварвания, рециклиране. Съществуващите технологии за производство са базирани на различни материали и електрохимични процеси, поради които батериите имат различни характеристики и параметри, които трябва да се



вземат предвид при използването им. Акумулаторните батерии базирани на суперкондензаторни елементи имат интересни характеристики (например зареждане за много кратко време в сравнение с останалите видове батерии), поради които са приложими като алтернативни акумулаторни батерии при електромобилите.

Цел на изследването на акумулаторни батерии от различен тип е да се установи сходство между предварително обявените характеристики и параметри с тези от проведени текущи измервания, за да е възможно по-точно да се определи текущото състояние и други важни параметри на акумулатора. По този начин може да се направи прогнозиране за настъпването на дефекти и отклонения от нормалните режими на работа, които могат да повлияят върху нормалното функциониране на електромобила.

Изследването на функционалните възможности на зарядни станции за променлив и постоянен ток за различните режими на работа при процеса на зареждане на акумулаторни батерии, загуби (КПД) при трансфер на енергия, натоварване на електропреносната мрежа, товарни характеристики при захранване на консуматори от различен тип и капацитет, определяне на оптимален режим за зареждане/разреждане, комуникации с батерийни контролери и захранваща мрежа и други.

Доказване на верността на разработените методики чрез симулационни модели и реални експерименти, при спазване на нормите за електромагнитна съвместимост. Обобщаване на резултатите в научни публикации, публикувани в национални и международни издания, статии в реномирани списания, представяне в научни форуми с участие на бизнеса и използване на научните резултати при практически раз-

работки, също могат да бъдат използвани за доказване на верността на разработките.

В) Формирани задачи за реализация

Очакваните резултати от изследванията са свързани с основните дейности и задачи, заложи в изследователската програма, които са:

1. Изследване на електромобили

1.1. Изследване и анализ на функционалността на подсистеми в електромобил за диагностика на състоянието;

1.2. Изследване и анализ на софтуера на електромобилите;

1.3. Разработване на алгоритъм и методика за конверсия на автомобил с ДВГ към електромобил;

1.4. Проучване и подбор на ел. мотор, контролер, акумулатор, сензори, софтуер, дисплей, функции по подобие на нормален автомобил при конверсия на автомобил с ДВГ към електромобил;

1.5. Разработване на специализиран хардуер и софтуер за обработка на сигнали от сензори и подсистеми и извеждането им на дисплей с подходящ потребителски интерфейс, при конверсия на автомобил с ДВГ към електромобил;

1.6. Изследване и анализ на моментни динамични характеристики и текущо състояние на електромобилите;

1.7. Изследване на възможности за рекуперация при електромобилите;

1.8. Изследване и създаване на алгоритми за оптимална експлоатация при различни терени и в зависимост от натоварването на автомобила;

1.9. Проучване и анализ на подходи за увеличаване на пробег на електромобилите;



1.10. Предлагане на подходи за увеличаване на пробега и живота на батерията на електромобилите чрез оптимизация на консумацията на подсистеми;

1.11. Проучване на възможности за осигуряване на допълнителна енергия на борда на хибридни и електрически превозни средства;

1.12. Изследване на възможности и създаване на алгоритми за подобряване на режима на работа, удължаване на жизнения цикъл и повишаване на текущите параметри на акумулаторната батерия в електромобила;

1.13. Разработване на симулационни модели на електромобили, отчитащи текущо натоварване, особености на терена, състояние на акумулаторите и други фактори;

1.14. Разработване на лабораторен стенд на електромобил за емулиране на работата на важни подсистеми в него, подходящ за провеждане на различни изследвания;

За тази дейност ще бъде достигнато ниво $TRL = 5$, тъй като се предвижда разработване на лабораторен стенд на електромобил за емулиране на работата на важни подсистеми в него, подходящ за провеждане на различни изследвания, в който създадената контролирана тестова среда е възможно най-близка до реалистичната, откъдето, може да се заключи, че новата технология е осъществима от технологична гледна точка.

2. Изследване на акумулаторни батерии от различен тип

2.1. Проучване за акумулаторни батерии от различен тип;

2.2. Изследване и анализ на основни характеристики, параметри и режими на работа на акумулаторни батерии от различен тип;

2.3. Методи за зареждане, разреждане и съхранение в склад на акумулаторни батерии с различни параметри и тип;

2.4. Изследване и анализ на последиците от прилагане на методи за бързо зареждане на акумулатори;

2.5. Изследвания и анализи с цел увеличаване на експлоатационния срок, запазване на експлоатационните характеристики за по-дълъг срок, установяване на причини за повреди и влошаване на експлоатационните характеристики, препоръки за удължаване на живота на акумулаторите при експлоатация и при съхранение;

2.6. Изследване на жизнения цикъл на акумулаторните батерии;

2.7. Рециклиране на стари акумулаторни батерии;

2.8. Изследване на суперкондензатори и акумулаторни батерии на тяхна база;

2.9. Изследване и анализ на основни характеристики, параметри и режими на работа на акумулаторни батерии на базата на суперкондензатори;

2.10. Методи за зареждане, разреждане и съхранение в склад на акумулаторни батерии на базата на суперкондензатори;

2.11. Изследване на акумулатори с малък капацитет (влошени параметри, изтекъл жизнен период) за захранване на малки консуматори;

2.12. Създаване на хъбови структури от стари батерии с цел постигане на мощност, осигуряваща захранване на други електрически превозни средства;

За повечето от предвидените задачи в тази дейност ще бъде достигнато ниво $TRL = 3$, свързано с изграждане на модели за доказване на концепциите, което означава, че новите технологии са осъществими от научна гледна точка.



За някои от предвидените задачи в тази дейност ще бъде достигнато ниво $TRL = 4$, тъй като се предвижда разработване на лабораторни стендове за изследване на акумулаторни батерии от различен тип, подходящи за провеждане на различни изследвания, за които създадената контролирана тестова среда е възможно най-близка до реалистичната, от където, може да се заключи, че новата технология е осъществима от технологична гледна точка.

3. Проучване и изследване на зарядни станции за променлив и за постоянен ток

3.1. Стратегии за разположение на зарядни станции и създаване на инфраструктури за зареждане;

3.2. Необходимост от електрифициране – създаване на нови трасета, увеличаване на мощността на съществуващи, промяна на съществуваща електрическа инфраструктура;

3.3. Електромобилност - подходи за увеличаване на пробега на малки и на големи консуматори, представляващи електрически превозни средства (автомобили, бусове, автобуси, товарни автомобили, влакове и др.);

3.4. Двупосочни зарядни станции и възможности за използване на акумулираната енергия в автомобила за захранване на допълнителни консуматори;

За някои от предвидените задачи в тази дейност ще бъде достигнато ниво $TRL = 3$, свързано с изграждане на модели за доказване на концепциите за новите технологии, осъществими от научна гледна точка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предстои да бъдат създадени теоретико-експериментални модели на базата на провеждане на изследвания и анализ на данни от реални образци и обекти (елек-

тромобил и негови подсистеми, акумулаторни елементи и батерии от различен тип, зарядни станции и др.) за определяне на техните параметри и характеристики. Ще се използват компютърни програми за създаване и изследване на симулационни модели, за установяване на корелация между разработените симулационни модели и теоретико-експерименталните модели на изследвани образци и обекти.

Поставените цели и задачи в настоящата изследователска програма са концентрирани върху разработване на методи и средства за решаване на енергийни и инфраструктурни проблеми, свързани с масовата електромобилност, водещи към конкурентни предимства и повишаване технико-експлоатационните качества на устройства с различно предназначение. Чрез създаването на съвременни методи за проектиране и анализ на средства за решаване на енергийни и инфраструктурни проблеми, свързани с масовата електромобилност, се реализира цялостен, функционално пълноценен продукт, чието внедряване съответства на оперативните цели на ИСИС 2021-2027.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Pencheva V., A. Asenov. Decarbonization of the transport in the region of Ruse and building an innovative capacity for the future. <https://conf.uni->



ruse.bg/bg/?cmd=dPage&pid=proc23-4.2
(16.09.2025)

- [2] CEER Report on Electric Vehicles: Network Management and Consumer Protection, Ref: C23-DS-CRM-161-03, 8 August 2023, <https://www.ceer.eu/wp->

content/uploads/2023/08/EV-Report.pdf
(16.09.2025).

- [3] Husain I. Electric and hybrid vehicles, Design Fundamentals, CRC Press LLC, 2003, ISBN 0-203-00939-8.



МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ГАБРОВО'2025

ИЗСЛЕДВАНЕ И МОДЕЛИРАНЕ ВЛИЯНИЕТО НА ЕЛЕМЕНТИТЕ НА РЕЖИМА НА РЯЗАНЕ ПРИ СТРУГОВАНЕ НА МЕСИНГ CUZN39PB3, ВЪРХУ ГРАПАВОСТТА НА ОБРАБОТЕНАТА ПОВЪРХНИНА

RESEARCH AND MODELING OF THE INFLUENCE OF CUTTING PARAMETERS ON THE ROUGHNESS OF THE MACHINED SURFACE WHEN TURNING CUZN39PB3 BRASS

Kalin Anastasov

Technical University of Gabrovo, BG

Petya Daskalova

Technical University of Gabrovo, BG

Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract

This article presents a study of the influence of the cutting parameters in turning—speed V_c (m/min), feed f (mm/rev), and depth of cut a_p (mm)—on the roughness of the machined surface. The study was conducted on cylindrical workpieces made of CuZn39Pb3 brass, in the condition in which the material was delivered. After the planned experiment, a study was conducted on the 2-D parameter R_a of the surface texture of the machined surface due to its great importance for the functional properties of machine element surfaces. The measurement data were processed using software, and theoretical-experimental models for roughness were obtained, reflecting the complex influence of the cutting mode elements when turning CuZn39Pb3 brass.

Keywords: Turning; Brass; Surface; Planned experiment; Functional properties; Theoretical – experimental models.

ВЪВЕДЕНИЕ

Струговане е един от основните технологични процеси за обработване на външни и вътрешни цилиндрични и профилни повърхнини чрез рязане на материала. Предимствата на метода са голямото разнообразие на обработваеми материали, включващи метали – черни, цветни и техните сплави, неметални материали – пластмаси, дърво и други. Процесът на рязане при струговане се осъществява на различни видове металорежещи машини и пос-

редством различни режещи инструменти. Независимо от техния вид, при всички случаи върху обработената повърхнина винаги остават следи от режещия инструмент, които представляват съвкупност от произволно разположени или подредени в определен ред падини и върхове, които формират повърхностната текстура на повърхнината, която се характеризира с голям брой параметри имащи функционално значение върху нейните свойства – коравина на контакт, якост на умора, кондук-



тивна топлопроводност, електропроводимост, триене и износване, мазане, механично уплътняване, корозия при умора, осигуряване допуските при сглобяване и други [1,2]. Върху нейното формиране влияят елементите на режима на рязане – скорост на рязане V_c , m/min (m/sec при шлифване), подаването f , mm/rev и дълбочината на рязане a_p , mm. Също така съществено влияние оказва вида на обработвания материал с неговите физико-механични характеристики, твърдостта технологията на получаване на изходната заготовка, металорежещата машина с нейната стабилност, режещия инструмент с неговата геометрия и не на последно място условията на протичане на процеса на рязане, а именно мазането и охлаждането в зоната на рязане.

Цветните метали – алуминий и неговите сплави, бронз, месинг и други са основни материали за производство на конструкционни машинни елементи. В повечето случаи имат отлична обработваемост чрез рязане, поради по-ниската си твърдост и позволяват интензифициране на процесите на механична обработка [5]. Месингът като представител на групата на цветните сплави е втората по големина група цветни сплави на медна основа. Притежава добри антифрикционни качества, корозоустойчивост, обработваемост, чрез класическите технологии – леене и рязане. В зависимост от процентното съдържание на елемента цинк има три вида месинг, различаващи се по своята микроструктура – със съдържание на цинк до 35% - *еднофазен α месинг*, 36% - 46% - *двуфазен ($\alpha+\beta$) месинг* и 46% - 50% - *β месинг* [3,4]. Прилага се за производство на конструкционни елементи в автомобилната промишленост, корабостроенето, електротехниката, архитектурата, медицината, това е месинга. Притежава добри антифрикционни качества, корозо-

устойчивост, обработваемост, чрез класическите технологии – леене и рязане.

Обект на настоящата работа е изследване на грапавостта на обработената повърхност на пробни тела изработени от месинг марка *CuZn39Pb3*, след струговане.

Цел на статията е изследване 2-D параметъра R_a от повърхностната текстура, след струговане, на заготовки от месинг *CuZn39Pb3*, в състояние на доставка, без предварителна термична обработка – отграване.

ИЗЛОЖЕНИЕ

1. МАТЕРИАЛИ И МЕТОДИ

1.1 Материал

Използваният материал е месинг, марка *CuZn39Pb3* с диаметър $\Phi 23$ мм, с химичен състав показан в табл.1. За изследване на химичния състав на материала е използван спектрометър *BELEG LAB 3000s*, представен на фигура 1.

Табл. 1. Химичен състав на месинг *CuZn39Pb3*

Zn	Sn	Si	Mn	Pb	Fe	P	Cu
33.41	0.13	0.02	0.03	3.23	0.2	0.06	62.87



Фиг. 1. Спектрометър *BELEG LAB 3000s*

Твърдостта HBW е измерена съгласно EN ISO 6506 с помощта на уред за изпитване на твърдост по метода на Бринел с диаметър на индентора $D = 4,83 \text{ mm}$, натоварване $F = 3000 \text{ Kgf}$ и време на задържане 15 s . Изпитването е проведено на твърдомер марка *INNOVATEST*, представен на фигура 2.

Резултатите след изпитване на твърдост са – $HB = 153.6$.



Фиг. 2. Твърдомер *INNOVATEST*

1.2 Машина, инструменти и приспособления

Експериментите са проведени на струго-фрезови център с ЦПУ, марка „РАЙС“, мод. *T2500*, представен на фигура 3.



Фиг. 3. Струго-фрезови център с ЦПУ, марка „РАЙС“, мод. *T2500*

Приспособленията използвани при експериментите са:

- Въртящ център;
- Патронник хидравличен;
- Зъбен център - фигура 4.



Фиг. 4. Зъбен център

Режещи инструменти използвани при експеримента:

На база на обработваемия материал с неговия вид и физико-механични характеристики, е прието обработката на опитните образци да се извърши с металокерамични сменяеми пластини *VCMT 160404-F3P* на фирма *ISCAR* [6], установени в призматичен държач *SVVCN 2525M-16* [6], като са осигурени следните геометрични параметри:

- главен установъчен ъгъл $k_p = 72,5^\circ$;
- спомагателен установъчен ъгъл ; $k_p' = 72,5^\circ$;
- главен заден ъгъл $\alpha_0 = 7^\circ$;
- радиус при върха на инструмента $r_e = 0.4 \text{ mm}$.

Пластината и държача с техните форма и размери са представени на фигури 5 и 6.



Табл. 3. План на експеримента и експериментални данни

№	X ₁	X ₂	X ₃	f, mm/rev	V _c , m/min	a _p , mm	Ra ₁ , μm
1.	-1	-1	-1	0.05	50	0.1	0.434
2.	+1	-1	-1	0.2	50	0.1	3.106
3.	-1	+1	-1	0.05	180	0.1	0.601
4.	+1	+1	-1	0.2	180	0.1	3.130
5.	-1	-1	+1	0.05	50	1	0.461
6.	+1	-1	+1	0.2	50	1	3.234
7.	-1	+1	+1	0.05	180	1	0.642
8.	+1	+1	+1	0.2	180	1	3.111
9.	-1	0	0	0.05	115	0.55	0.557
10.	+1	0	0	0.2	115	0.55	3.161
11.	0	-1	0	0.125	50	0.55	1.100
12.	0	+1	0	0.125	180	0.55	1.403
13.	0	0	-1	0.125	115	0.1	1.137
14.	0	0	+1	0.125	115	1	1.200

Табл. 4. Стойности на полиномните коефициенти

b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₁₁	b ₂₂	b ₃₃	b ₁₂	b ₂₃	b ₁₃
1.220	1.305	0.055	0.024	0.639	0.032	-0.051	-0.056	-0.017	-0.005

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ И КОМЕНТАРИ

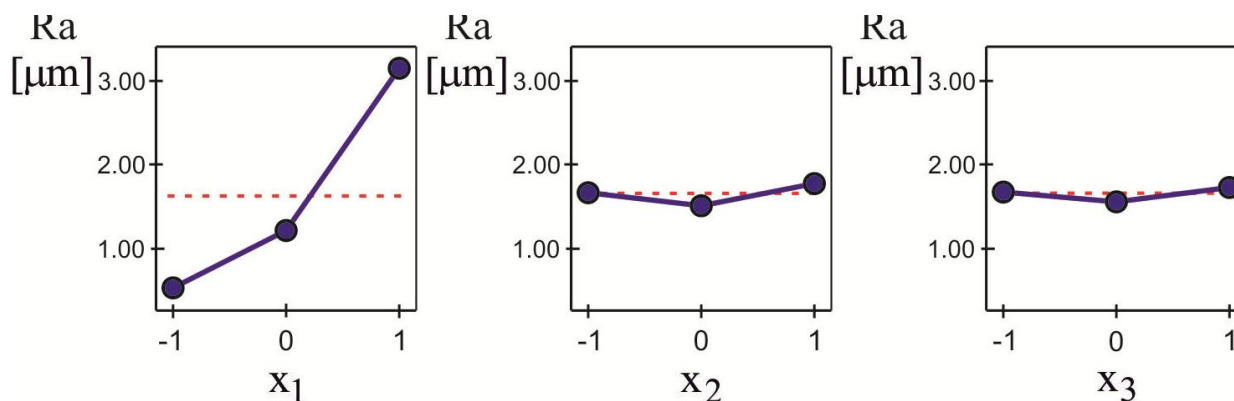
Резултатите от проведения експеримент са обработени с програмния продукт *QstatLab* и е получен регресионен модел – полином от втори ред, за грапавостта на обработената повърхнина от вида:

$$Y_{Ra} = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i x_i + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i-1}^3 b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^3 b_{ii} x_i^2 \quad (1)$$

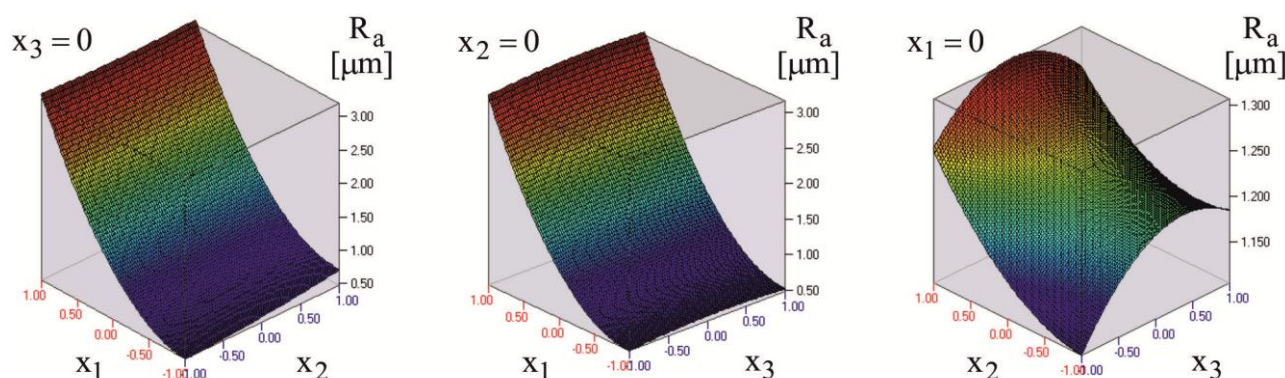
Стойностите на коефициентите на полинома са представени в таблица 4.

На фигура 8 са показани основните ефекти (степената на влияние на всеки фактор, върху грапавостта *Ra*), получени чрез анализ на вариацията (ANOVA). Най – значим фактор е скоростта на подаването – *f*, докато останалите два фактора – скорост *V_c* и дълбочина на рязане *a_p*, влияят много слабо върху *Ra*.

Графичния вид на модела е представен на фигура 9.



Фиг.8. Степен на влияние на елементите на режима на рязане върху грапавостта *Ra*



Фиг.9. Графичен вид на модела

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено е експериментално изследване на влиянието на елементите на режима на рязане - скорост на рязане V_C , m/min , подаване f , mm/rev , дълбочина на рязане a_p , mm върху грапавостта на обработената повърхнина при струговане на месинг $CuZn39Pb3$. Изследването е проведено, чрез планиран експеримент. След обработка на резултатите установено, че подаването има доминиращо влияние върху параметъра грапавост на обработената повърхнина, а скоростта на рязане и дълбочината много слабо въздействие.

Получените експериментални резултати позволяват проектиране на високопроизводителни технологични процеси за обработване чрез струговане на месинг върху ММ с ЦПУ, удовлетворяващи съвременните изисквания по отношение на качество и себестойност на произвежданата продукция.

Благодарности

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005

вации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност, „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Duncheva G, Surface integrity prez prizmata na surface engineering. Universitetsko izdatelstvo, “Vasil Aprilov”, Gabrovo, 2023, ISBN: 978-954-683-691-5.
- [2] ASME B46.1-2009, Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay), An American National Standard, 2009.
- [3] Maximov J., Dunchev V., Todorov V. Metaloznanie i termichna obrabotka. Chast I: Metaloznanie. Universitetsko izdatelstvo Vasil Aprilov. Gabrovo. 2024. ISBN 978-954-683-696-0.
- [4] Maximov J., Dunchev V., Todorov V. Metaloznanie i termichna obrabotka. Chast II: Metaloznanie. Universitetsko izdatelstvo Vasil Aprilov. Gabrovo. 2024. ISBN 978-954-683-696-0.
- [5] <https://info@werkstofftechnik.com>
- [6] <https://www.iscar.com/eCatalog/>

----- www.eufunds.bg -----

Проект BG16RFPR002-1.014-0005, Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Оперативна програма „Наука и образование за интелигентен растеж“, съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейските структурни и инвестиционни фондове.