



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“

22 май 2023

Габрово



ЕВРОПЕЙСКИ СЪЮЗ
ЕВРОПЕЙСКИ СТРУКТУРНИ И
ИНВЕСТИЦИОННИ ФОНДОВЕ



ОПЕРАТИВНА ПРОГРАМА
НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ ЗА
ИНТЕЛИГЕНТЕН РАСТЕЖ

**INTERNATIONAL
SCIENTIFIC CONFERENCE**

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

PROCEEDINGS

**22 MAY 2023
GABROVO**

The conference is held on:

Project BG05M2OP001-1.002-0023 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

© UNIVERSITY PUBLISHING HOUSE “V. APRILOV” – GABROVO, 2023
TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO

ISSN: 2815-4924



ЕВРОПЕЙСКИ СЪЮЗ
ЕВРОПЕЙСКИ СТРУКТУРНИ И
ИНВЕСТИЦИОННИ ФОНДОВЕ



ОПЕРАТИВНА ПРОГРАМА
НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ ЗА
ИНТЕЛИГЕНТЕН РАСТЕЖ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ

„МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“

СБОРНИК ДОКЛАДИ

22 МАЙ 2023
ГАБРОВО

Конференцията се провежда по:

Проект **BG05M20P001-1.002-0023** - **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’23

СБОРНИК ДОКЛАДИ

Формат: 70/100/16

Печат: Университетско издателство “Васил Априлов” – Габрово

ISSN: 2815-4924



**МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ
„МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“
ГАБРОВО 23**

**по проект BG05M2OP001-1.002-0023 Център за компетентност
„Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“**

Габрово, 21 май 2023 – 23 май 2023 година

Организационен комитет:

Председател: проф. д-р инж. Райчо Иларионов - ТУ-Габрово, България

Членове: доц. д-р инж. Пламен Цанков - ТУ-Габрово, България
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
чл. кор. проф. д-р Тони Спасов - СУ „Св. Кл. Охридски“ ФХФ, България
чл. кор. проф. д-р Красимир Данов - СУ „Св. Кл. Охридски“ ФХФ, България

проф. д-р инж. Иван Кралов - ТУ-София, България
проф. д-р инж. Венцислав Вълчев – ТУ-Варна, 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. д-р Румен Каканакков - ЦЛПФ, БАН-Пловдив, България
проф. д-р Лиляна Колаклиева - ЦЛПФ, БАН-Пловдив, България
проф. д-р Таньо Танев - Институт по роботика, БАН, София, България
доц. д-р Кръстанка Маринова - СУ „Св. Кл. Охридски“ ФХФ, България
доц. д-р Август Иванов - Институт по роботика, БАН, София, България
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
проф. д-р Николай Ганев – Чехия
доц. д-р Егнар Йоздикилилер - Турция
доц. д-р инж. Станислав Немечек - Чехия
проф. д-р инж. Йордан Максимов - ТУ-Габрово, България
проф. д-р 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. д-р 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

STATE OF THE ART OF MEMS IN MECHATRONICS	9
Stefan Kartunov <i>skartunov@abv.bg, Bulgaria</i>	
MODERN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF ELECTRONIC SYSTEMS FOR POSITIONING SYSTEMS	17
Prodan Prodanov <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
MACHINING OF TOOTH PROFILES ON CNC MACHINES	23
Hristo Yakimov, Irina Alexandrova, Yosif Mityev <i>Technical University – Gabrovo, Bulgaria</i>	
MULTISENSOR SUNFLOWER OIL QUALITY ASSESSMENT SYSTEM BASED ON “ELECTRONIC NOSE”	28
Stefan Ivanov, Todor Todorov, Toshko Nenov <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
CONTEMPORARY LABORATORY LIGHTING ENGINEERING MEASUREMENTS USING A GONIOPHOTOMETER AND A SPECTRORADIOMETER WITH AN INTEGRATING SPHERE AT THE TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO	35
Plamen Tsankov, Ivaylo Stoyanov, Milko Yovchev, Hristo Ibrishimov, Ivaylo Lazarov <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
EXPLORATION OF HYDROACOUSTIC DOLPHIN SIGNALS	42
H. Zhivomirov, I. Nedelchev, H. Pirovsky, G. Dimitrov <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
IMPLEMENTATION OF ROBOTIC AND ASSISTIVE TECHNOLOGIES IN THE PATIENT-CENTERED PHYSICAL REHABILITATION	49
Tanio Tanev, Pancho Dachkinov, Tony Valayil, Maya Dimitrova, Snezhana Kostova, Anna Lekova <i>Institute of Robotics Bulgarian Academy of Sciences, Bulgaria</i>	
USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO GENERATE THE DESIGN OF OBJECTS	55
Lachezar Hristov, Stefan Ivanov <i>lachezar.hristov00@gmail.com, Bulgaria</i>	
SYNTHESES, STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE LAYERS IN THE SYSTEM TI-B OBTAINED BY A SCANNING ELECTRON BEAM	60
Fatme Padikova¹, Daniela Nedeva², Borislav Stoyanov², Vladimir Dunchev², Maria Ormanova¹, Georgi Kotlarski¹, Stefan Valkov¹ ¹ <i>Academician Emil Djakov Institute of Electronics – Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria</i> ² <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	

INDUSTRIAL ASSEMBLY LINE OPERATION.....	66
Albena Taneva, Desislava Atanasova, Krum Kutrynski, Michail Petrov	
<i>Control Systems Department</i>	
<i>Technical University of Sofia, Plovdiv Branch, Bulgaria</i>	
GROWTH OF GIANT MICELLAR AGGREGATES: QUANTITATIVE THEORY VS EXPERIMENTS.....	77
Krassimir Danov, Gergana Radulova, Mihail Georgiev, Peter Kralchevsky	
<i>Department of Chemical and Pharmaceutical Engineering,</i>	
<i>Faculty of Chemistry and Pharmacy, Sofia University, Bulgaria</i>	
IMPROVEMENT OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ELECTRON-BEAM WELDED ALUMINIUM ALLOY BY INTRODUCING ALLOYING ELEMENTS INTO THE WELD SEAM	83
Maria Ormanova¹, Stefan Valkov¹, Nikolai Ivanov¹, Darina Kaisheva¹, Angel Anchev², Georgi Kotlarski¹, Vladimir Dunchev², Dimitar Dechev¹, Borislav Stoyanov²	
¹ <i>Academician Emil Djakov Institute of Electronics – Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria</i>	
² <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
OPTIMIZATION OF THE TEMPERATURE SYSTEM OF SYRINGE MOLDS FOR INJECTION MOLDING OF POLYMERS.....	88
Irina Aleksandrova, Hristian Mitev, Kalin Anastasov	
<i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
TEXTILE WASTE – ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL FEASIBILITY.....	92
Svetla Panayotova, Ivanka Stoyanova-Todorova	
<i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
IMPACT OF GEOMETRIC TE PARAMETERS AND CONSTRAINTS ON THE COLLECTIVE BEHAVIOR OF AUTONOMOUS ROBOTS FORMATION.....	98
Vanya Markova, Ventseslav Shopov	
<i>Institute of Robotics – Bulgarian Academy of Science</i>	
MONITORING AND INVESTIGATION OF A GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC POWER PLANT AT GABROVO TECH PARK	104
Plamen Tsankov, Ivaylo Lazarov, Ivaylo Stoyanov, Milko Yovchev, Hristo Ibrishimov	
<i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
INFLUENCE OF OUTPUT CIRCUITS ON VIBRATING PIEZOELECTRIC HARVESTER.....	110
Rumyana Stoyanova, Dimo Kolev, Velimira Todorova	
<i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
CONTACTLESS CHARGING SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLES WITH RESONANT CIRCUIT.....	120
Nikolay Madzharov¹, Desislav Iliev¹, Egnar Ozdikikiler²	
¹ <i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
² <i>Istanbul Technical University, TR</i>	

INVESTIGATION OF CATIONIC SURFACTANTS ADSORPTION BEHAVIOUR ON SILICON WAFERS USING IMAGING ELLIPSOMETRY	125
Mihail Georgiev, Boris Konstantinov, Krastanka Marinova, Jordan Petkov, Krassimir Danov	
<i>Department of Chemical and Pharmaceutical Engineering, Faculty of Chemistry and Pharmacy, Sofia University, Bulgaria</i>	
STUDY OF THE RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF VEGETABLE OILS.....	131
Hristo Hristov, Plamen Bonev, Georgy Iliev	
<i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
EXPERIMENTAL STUDY OF RESIDUAL STRESSES AROUND FASTENER HOLES IN 2024-T3 ALUMINUM ALLOY VIA MODIFIED SPLIT MANDREL METHOD.....	136
Vladimir Dunchev, Petya Daskalova	
<i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
NANOHARDNESS AND MODULE OF ELASTICITY OF CR-BASED NITRIDE COATINGS DEPOSITED AT TEMPERATURES BELOW 200°C	151
Vassiliy Chitanov¹, Ekaterina Zlatareva¹, Lilyana Kolaklieva¹, Roumen Kakanakov¹, Tetiana Cholakova¹, Stefan Kolchev¹, Chavdar Pashinski¹²	
¹ <i>Central Laboratory of Applied Physics, Bulgarian Academy of Sciences, Plovdiv, Bulgaria</i>	
² <i>Department of Mechanics, Technical University - Sofia, Br. Plovdiv, Bulgaria</i>	
FATIGUE BEHAVIOR EXPERIMENTAL STUDY OF SPECIMENS WITH FASTENER HOLES IN 2024-T3 ALUMINUM ALLOY SUBJECTED TO COLD EXPANSION VIA MODIFIED SPLIT MANDREL METHOD	155
Angel Anchev, Vladimir Dunchev, Petya Daskalova	
<i>Technical University of Gabrovo, Bulgaria</i>	
PROSPECTS FOR DEVELOPMENT OF LABORATORY 7.5 "INTELLIGENT ENERGY SAVING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES" AT THE CC "INTELLIGENT MECHATRONIC, ECO AND ENERGY SAVING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES"	164
Georgi Ganey, Stanimir Stefanov	
<i>Technical University of Sofia, Plovdiv Branch, Bulgaria</i>	
ROBOTIZED SYSTEM CONFIGURATION WITH COLLABORATIVE FUNCTIONS AND MACHINE VISION	170
Tihomir Stoyanov, Katia Madzharova, Pavel Radev, Vasil Popov, Nikola Shakev, Sevil Ahmed, Andon Topalov	
<i>Technical University of Sofia, Branch Plovdiv, Control Systems Department</i>	
MOBILE, ROBOTIC PLATFORM.....	176
Tihomir Stoyanov, Vasil Popov, Sevil Ahmed, Andon Topalov, Katya Madzharova, Nikola Shakev	
<i>Technical University of Sofia, Branch Plovdiv, Control Systems Department</i>	



СЪВРЕМЕННО СЪСТОЯНИЕ НА MEMS В МЕХАТРОНИКАТА STATE OF THE ART OF MEMS IN MECHATRONICS

Ем. проф. Стефан Кирилов Къртунов
skartunov@abv.bg

Abstract: *The high-tech nature of MEMS, research and rapid development, combined design, manufacturing and test methodologies, make the creation and maintenance of MEMS more and more a challenge for the development of mankind and in particular in mechatronics. The purpose of this report is to analyze the state of MEMS in mechatronics. In order to achieve the goal, the tasks of classification, technology, areas of application and the state of the market are set. The setting of the study is the overview-analysis of MEMS. As a result, the state of the market, data and forecast for the sales of MEMS in the market are indicated. Creating and maintaining MEMS is increasingly becoming a technological challenge. The research used 4 sources by the author, and it itself can be applied in research projects for the development of specific MEMS.*

Ключови думи: микроелектромеханични системи, конструкция, технология

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Развитието на микро електро-механичните системи (MEMS) вече има над 50-годишна официална история, но широко практическо разпространение тези системи получават в средата на 90-години на миналия век. В началото на 90-те MEMS се появяват от необходимостта да се вградят сензори, актуатори и контролиращи функции в интегрални схеми чрез използването на производствени процеси като селективно ецване и микроструктуриране. Преди около 10 г. те прерастват в НЕМС (от англ. език Nano Electro Mechanical Systems). В резултат на еволюцията на MEMS се получава умаление в механичните компоненти на системите до наноразмери, намаляват се тяхната маса и значенията в параметрите на взаимодействие, при това се увеличава резонансната им честота, което означава значително повишаване на тяхната функционалност. Това развитие налага да се изследва състоянието на MEMS като известни разработки предлагат Yole, Databridgemarketresearch, Fraunhofer Institut и други последователно и с подробни ре-

зултати. Много от фирмите вече не дават данни по разбираеми причини за количеството продадени MEMS. Затова това изследване си поставя скромната задача да обобщи и представи данни, необходими за конкуренцията в бранша.

2. ИЗЛОЖЕНИЕ

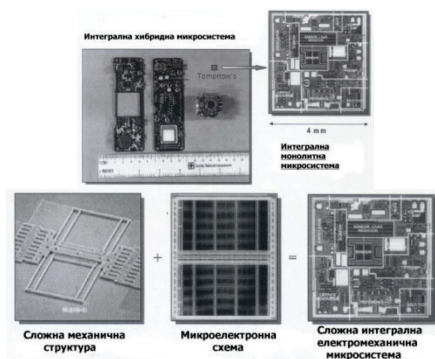
2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗА МИКРОСИСТЕМА. КЛАСИФИКАЦИЯ

Целта на този доклад е да се анализира състоянието на MEMS в мехатрониката като се разгледат конструкцията, технологията, областите на приложение и фирмите на пазара. Информацията е важна за производители и разработчици и предлага едно виждане на автора вследствие натрупания опит през годините.

Като микросистема може да се дефинира всеки елемент, уред или система, заместени от определен брой компоненти [1, 2, 3, 11, 12,]. MEMS представляват комбиниране на механични елементи (като сензори и актуатори) с електронни елементи на една обща силициева подложка чрез ми-



кро-производствена технология. Микро-системите се конструират от компоненти, изготвяни по технологии върху различни подложки, но накрая свързани заедно във вид на **хибридна микросистема**. Например, в силициевия чип може да се реализира управляваща схема, докато управляваните от нея изпълнителни механизми могат да се изготвят от пластмаса чрез формоване или използване на LIGA технология (фиг. 1,а). Втората възможност е всички компоненти на системата да бъдат изготвени в обща подложка (например, силициева) чрез подходяща технология във вид на **монолитна (интегрална) микросистема** (фиг. 1, в, с). Избраният пример дава пълна представа за видовете MEMS.



Фиг. 1. Видове микросистеми в зависимост от използваната подложка

MEMS устройствата се разделят и на пасивни и активни, според типа на механиката, която се използва. Друга класификация на MEMS устройства може да се направи в зависимост от мястото и функцията на една система: Външни RF (RF extrinsic) MEMS, при които структурата се намира извън RF веригата и задвижва или контролира други устройства в нея (например настройваеми предавателни микролентови линии, фазоизмерващи линии и матрици), Вътрешни RF (RF intrinsic) MEMS, при които RF структурата се намира вътре в RF веригата и има едновременно RF функции и в резултат на механическо дей-

ствие (например микроключове и кондензатори тип „гребен“) и Реактивни RF (RF reactive) – при тях MEMS структурата е локализирана вътре във веригата (например планарни микровълнови филтри). Терминът RF MEMS означава микроелектромеханична система за радио-честотни приложения от 300 MHz до 300-400 GHz на високи честоти – антени, предавателни линии и микрорелета. MEMS елементите, които се използват във високочестотните и свръхвисокочестотни системи, могат да се разделят в няколко основни групи: радио-честотни RF MEMS ключове и микрорелета, RF MEMS бобини, индуктивности и кондензатори, RF микромашинни фазорегулатори и изместващи филтри (phase shifters), RF микромашинни предавателни линии (transmission lines), RF микромашинни антени и варикапи.

2.2.ТЕХНОЛОГИЯ

Разработките в областта на микросистемната техника се развиват интензивно в технологично отношение и използват връзката между производствена технология, физика на процесите в елементите и проектиране на интегралната обработваща схема, всички подчинени на изискванията към специфичната MEMS. Докато електронните обработващи схеми се произвеждат посредством познатите планарни технологични процеси за създаване на интегралните схеми (биполярни, MOS, CMOS, BiCMOS), то микромеханичните компоненти използват подходящи процеси за "3D-микрообработка", такива като селективно ецване на силициевата подложка, или добавяне на нови структурни слоеве за формиране на механични и електромеханични елементи [5]. MEMS е и производствена технология - нов начин за изготвяне на сложни електромеханични системи чрез използване на групови методи за производство, подобни на тези за производство на интегрални схеми, от коя-



то пряко зависи конструкцията и което позволява интеграция на електромеханичните елементи с електронната обработваща система. Следователно има единство между конструкция и технология.

2.3. ОБЛАСТИ НА ПРИЛОЖЕНИЕ

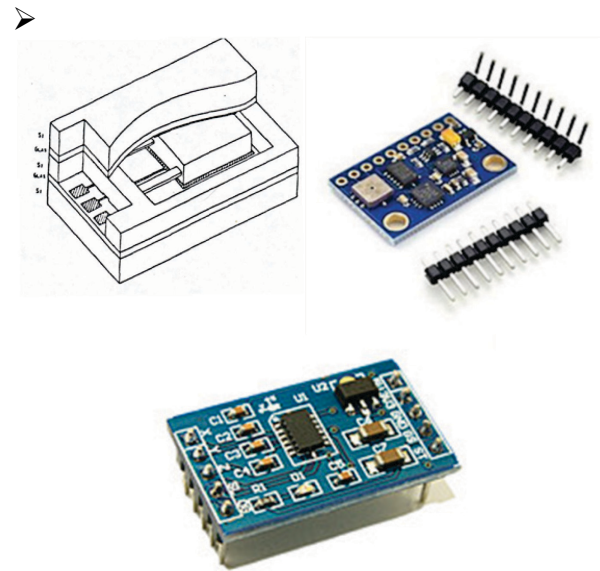
Типични области на приложение са:

- ✓ Мобилни комуникации като:

Тенденцията в съвременните комуникации е за създаване на устройства с все повече възможности (например “смартфони”), имащи все по-малки габарити и работещи на все по-високи честоти, изисква увеличаване на сложността на ИС и намаляване на броя на външните елементи. Участието на MEMS е много ефективно преди всичко за замяна на съществуващите дискретни ключове, бобини, варикапи и резонатори с намиращи се в самата ИС MEMS реализации. Например при MEMS до 25GHz, отражението (Reflexion Loss) при затворен ключ е -1,2 dB, коефициентът на изолация на отворения ключ е -35 dB, а честотите както следва: GSM (900 MHz & 1800MHz), UMTS/3G/(1.9-2.2GHz), Bluetooth (2.45GHz) и особено влияние за 5G- мрежите.

- Wireless Local Area Networks/WLAN's/ - HIPERLAN (5.2-5.8 GHz);
- Сателитни комуникации - Mobile Satellite Services/MSS /(0.3-30 GHz), за навигация GPS(1.2-1.6GHz), за сателитна телевизия - DBS(10-12GHz), сателитни телефонни услуги, метеорологически сателитни услуги;
- Електроника в автомобилостроенето-NOD- система за разпознаване на близкостоящи предмети, детектори при удар, устройства за разпознаване на радар (24GHz), идентификация на превозното средство, устройства за контрол на скоростта (ACC – 2GHz);
- Радар-наблюдение, мониторинг на превозни средства, измерване на скорост, навигация (1-100GHz);

- Отбранителни системи-електронни системи във военното дело (EW-electronic warfare), системи за надзор и детектиране;
- Акселерометри - В сравнение с класическите акселерометри, произведените чрез MEMS технология са по-малки, леки и надеждни и в пъти по-евтини. Това определя основното им засега приложение – за задействане на въздушната възглавница при рязко спиране на автомобила. Подразделят се по *Обхватът* (Range), който показва диапазона на ускорения, които могат да бъдат измервани (0,1g – 500g), а по начин на работа – на аналогови, цифрови и импулсни. По конструкция са едно-, дву- и триосни според основата на корпуса. Основното предимство на дву- и триосните акселерометри е, че пластините са строго перпендикулярни една на друга и няма опасност да се разместят. Измерваното ускорение се превръща в 10-разредно число, което се предава чрез SPI интерфейс. Подходяща команда по него може да сменя обхвата на $\pm 2g$ и съответно повишава чувствителността на 256LSB/g.

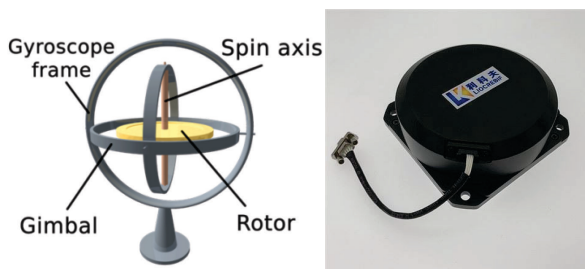


Фиг. 2. Сензор за ускорение на фирмата Bosch GmbH Германия и акселерометри

- ✓ Жироскопи или сензорите за ъглова скорост (Angular Rate Sensor).



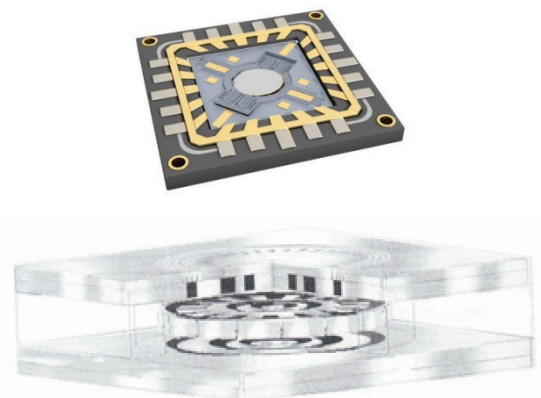
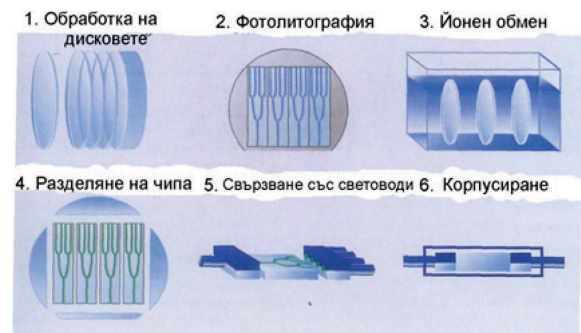
Във всички видове MEMS- жирокопи въртящото се тяло се реализира върху силициев кристал и движението му се осигурява чрез създаване на електро-магнитно или електростатично поле. Миниатюрната механична система вибрира на резонансната си честота. Съществуват жирокопи с една ос (като правило Z) и такива с две оси (X и Y). Същността на приложението на жирокопите е следене на положението на даден обект и изработване на електрически сигнал при промяната му. Ъгловата скорост \dot{W} на въртящо се тяло показва на колко градуса то се завърта за 1s и съответно има измерение $^\circ/s$. Жирокоп от тази серия е ADXRS300. Съществуват комбинирани модули, съдържащи акселерометър и жирокоп. Фирма в бранша е Liorebifx, Китай.



Фиг. 3. Принцип на работа на жирокоп.
Фиброоптичен жирокоп
Легенда: рамка, кардан, ос на въртене и ротор

➤ Микроогледала - тънък алуминиев лист с квадратна или кръгла форма, който отразява над 90% от попадналата върху него светлина. Целият процес на формиране на изображението се нарича цифрова обработка на светлината DLP (Digital Light Processing). Съществуват специализирани уреди за принтери на електрофотографски принцип с 7056x64 пиксела, които за лист A4 осигуряват разделителна способност 600dpi. Друга област на приложение на микроогледалата са оптичните комуникации, където вече се наложи терминът Micro-Opto-ElectroMechanical Systems, MOEMS.

Необходимостта от увеличаване на скоростта на предаване по световодите над десетина Gbps изисква използването на изцяло оптични ключове (All Optical Switch). Набор от такива ключове с възможност за наклоняване в две взаимно перпендикулярни оси (RX и RY) от вида 1xn, nx1 и nxn произвежда фирмата Colibrys. Много важно приложение е за реализация на *настройваеми лазери* (Tunable Laser), дължината на вълната на чиято светлина се променя чрез движение на микроогледало в перпендикулярна посока на повърхността му. Например микроогледалата от този тип на фирмата MEMS Optical могат да се придвижват на разстояние между 10 и 100 μ m. Очаква се приложенията на микроогледалата в оптичните комуникации силно да нарастват през следващите години.

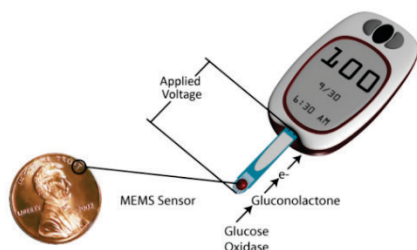
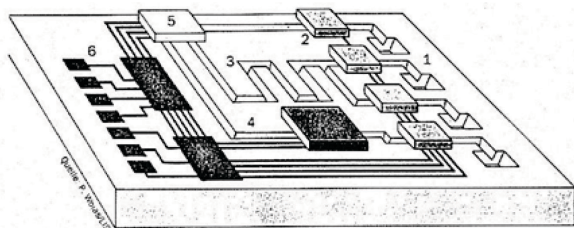


Фиг. 4. Технологичен процес за оптични структури на интерферометър. Микроогледало с ротация по 2 оси, интегрирано към чип с пряко рефлетиране за полигонен скенер



Фигура 4. [5] дава представа за технологичен процес на фини оптични структури за сензорната глава на интегриран лазерен оптичен интерферометър и огледало за полигони и скенер за телевизионни изображения. Фирми в тази област са Equinox Graphics, Ormoser.

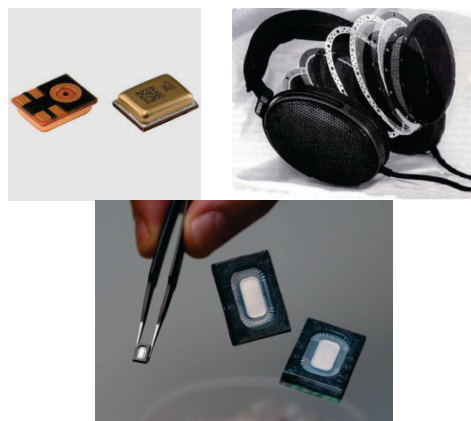
➤ MEMS в медицината – В края на ХХ-век започнаха да се внедряват комплексни микросистеми за анализ, разработени върху един чип. Пример за това представлява схемата за кръвна проба 3 (фигура 5), която се състои от канали 1, провеждащи реагентите и микровентил 2. Микроромпата 4 подава пробата към сензор 5, където се оценяват различните съставки на кръвта (Na, K, гликоза). Управляващата схема 6 регулира протичането на процеса и извежда измерените параметри. В последствие тези био-MEMS придобиха най-различни функции за терапевтични практики, вкл. – и за Ковид. Едно виждане за приложение на MEMS в медицината е представено в [13].



Фиг. 5. Микросистема, изработена с прилагане на йонно-лъччево ецване. Био- MEMS на Southwest Center for Microsystems Education (образование)

➤ MEMS в NiFi-техниката.
Микрофони и слушалки. Говорители

По своята същност те са кондензаторни микрофони, известни като най-висококачествения тип [6]. Тези микрофони са особено подходящи за всякакви миниатюрни апаратури, например мобилни телефони, автомобили и регистрация. Фирмите на пазара са: STMicroelectronics, TDK, Knowles, Joi-IT, Infineon, Adafruit – САЩ, Dahua и др. Поради анизотропията в структурата на стъклото при ецване в течни киселинни разтвори се образуват отвори. Пример за ецване на fotocувствително стъкло FOTURAN® за приложение в аудиотехниката е представен на фиг. 6. (снимка Schott GmbH Германия) [7]. Предимство на микроструктурите от fotocувствително стъкло при практическо приложение е тяхната висока температурна и химическа устойчивост. Безжични слушалки произвеждат фирмите Xiaomi, Lenovo, TWS, Dacom и др. Говорителите работят главно на база пиезоелектрични слоеве с определено напрежение.



Фиг. 6. Микрофон на фирма Knowles Electronics, САЩ. Детайли на слушалки от стъкло FOTURAN®. Говорители AudioXpress

➤ Микроелектромеханични устройства – разделят се основно на микромеханика на повърхностния слой и на обема на твърдото тяло в зависимост от начина на формиране на слоевете. Описани са подробно в [8].



➤ MEMC в екологията – предишен етап на изследване [10].

2.4. АНАЛИЗ НА ФИРМИТЕ И СЪСТОЯНИЕТО НА ПАЗАРА

Приложени са похвати за анализа, подходяща за постигане на целта като изследване делът на MEMC по видове, ръстът за развитието им през годините, търсене, нови разработки, продажби на пазара и др. Водещите фирми-производителки на MEMC са: Bosch продължава да бъде лидер на MEMS с изключителен бизнес и растеж. По същия начин продажбите на STMicroelectronics и TDK нараснаха значително през 2021 г. RF MEMS филтрите на Broadcom, Qorvo и Skyworks продължават да се движат от 5G вълната. Първите 10-на фирми запазват своето традиционно място през последните няколко години, а по-малки фирми като SiTime, USound, xMEMS, OQmented, Sensirion и т.н. имат растеж благодарение на ново-възникващи MEMC. Сега се появяват компании с т.н. „изнесено производство“ като Sylex, Teledyne и TSMC, които увеличават приходите си. Безпрецедентното търсене особено на сензори доведе до инвестиране във нови фабрики от Bosch за 300 мм силициеви дискове-подложки, SilTerra, Silan Microelectronics, пазарът е наситен с оборудване на високи цени, а срокът за доставка е по-голям от 15 месеци. Придобиването на бизнеса също е в ход като Silex купи Elmos, Mitsumi – Omron, а ИМИ (Филипините) – ЕПИК (Ботевград). Водещата позиция се определя от диаметъра на дисковете-подложки с тенденция към 400mm. Ръстът на производството на MEMC от 2012 до 2019 г. е 13%, следва ръст от 11,3% поради Ковид. Информационната (IT) и автомобилната индустрия дълго време бяха развиващи се пазари за MEMC сензорите. Сега пазарът се формира от сен-

зори за ускорение, жirosкопи (10%), акселерометри (6%), уреди за измерване на наклон, а също така и сензори за налягане (6%) и дебит. Нови приложения включват инфрачервени сензори за качество на въздуха, микроскенери за дисплеи, а също така и MEMC-осцилатори и системи за рекуприране на енергия, системи в отбраната, космическата техника и други. Все пак 2021 г. се бележи от сензорите за автомобили, интелигентни часовници, както и тези за медицинските и индустриални пазари, особено делът на потребителската електроника за 2022 г. остава най-голям. Силното търсене на MEMC и запълнените графици до края 2023 г. води до намаляване на ръста на 9% поради по-високите разходи, липса на стандартизация и макроикономическа ситуация през годината и очакващата се по-късно до към 2027 г, дори ръст 12,9% до 2028 г. Над 70 фирми произвеждат изделия, използващи DLP технологията, като само Texas Instruments годишно продава 2 млн. Много от фирмите вече не дават данни по разбираеми причини за количеството продадени MEMC, но ако се базираме на данни от 2004 г. общо от 4.10⁶ броя, може да се съпостави количеството на база направените обороти. Подетайлна информация по различни критерии може да се намери в [14] и от сайтовете на фирмите. Азиатско-Тихоокеанският регион има доминираща роля в глобалния пазар (предимно Япония), една четвърт от производство е в Северна Америка, САЩ. В България, Ботевград и Пловдив фирмите-представители на ИМИ, Сенсата и Мелексис произвеждат електронни модули и компоненти за автомобили, има и лаборатории и ППП за проектиране на MEMC [9]. Конференции, на които се отчита състоянието на MEMC, са традиционната в Мюнхен-21, Гренобъл-22, Инфотех-23, MICRO.tec и др.



- [7] VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikro-und Feinwerktechnik, GMM – Report, Bad Langensalza, Thomas Müntzer GmbH, 2000.
- [8] Kartunov S., Investigating of micromechanical components from actuating transmission mechanism (actuators), Bukarest, 2007, ISSN 1224-7480, МОСМ, N:13, Vol. II, p. 373-378, МОСМ200713V02501A0066.
- [9] Къртунов С., В. Маркова, Учебно - изследователска система за автоматизирано проектиране на компоненти и избор на технологични процеси за тях в микросистемната техника, Слънчев бряг, НК “Техномат и инфотел”, 2006// Kurtunov S., V. Markova, Educational and research system for automated design of components and selection of technological processes for them in microsystem technology, Sunny Beach, NC "Technomat and Infotel", 2006, стр. 309-319, ISBN 954-9368-15-7.
- [10] Kartunov S., Micro-electromechanical Systems in the Ecology, Rezegne, 8. International Conference "Environment. Technology. Resources", Rēzeknes Augstskola, Rēzekne, RA Izdevniecība, 2011, ISSN 1691-5402, ISBN 978-9984-44-071-2, Volume 1, p. 163-172, БД „SCOPUS”zdb.ru.lv/conferences/3/VTR8_II_163.pdf.
- [11]. D. Banks Introduction to Microengineering. достъпно на: <http://www.dbanks.demon.co.uk/ueng>, април 2023.
- [12]. М.А. Michalicek Introduction to MEMS. достъпно на: <http://www.colorado.edu/c1.res.ppt/ppt>, април 2023.
- [13] Chowdhury Asif, MEMS Packaging for High Volume Products, достъпно на: <https://embeddedcomputing.com/technology/analog-and-power/analog-semiconductors-sensors>, април 2023
- [14] Global Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) Market - Industry Trends and Forecast to 2028, достъпно на: <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-micro-electro-mechanical-system-mems-market>, април 2023
- [15] Damianos Dimitrios, 2021 was an exceptional year for MEMS companies. What is next?, достъпно на: <https://www.yolegroup.com>, 05.09.2022.



СЪВРЕМЕННИ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИЕТО НА ЕЛЕКТРОННИТЕ СИСТЕМИ ЗА ПОЗИЦИОНИРАЩИ СИСТЕМИ

MODERN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF ELECTRONIC SYSTEMS FOR POSITIONING SYSTEMS

Prodan Ivanov Prodanov

*Department of Electronics, Faculty of Electrical Engineering and Electronics
Technical University of Gabrovo
4 Hadji Dimiter str., 5300 Gabrovo, Bulgaria
pprodanov@tugab.bg*

Abstract

The currently observed trends of active application and implementation of positioning systems, in particular servo drive systems and systems with stepper motors in the industry, is conditioned by the growing requirements for technological equipment and the quality of processing and production of the final product. The purpose of the study is to research and present the current trends in the development of electronic systems used in the control of positioning motors. The main tasks are related to the systematization of parameters and functionality of this type of electronic systems. As a result of this study and systematization, a criteria for a reasoned choice for a specific technological operation or process can be presented. The limitations in preparing this paper come from the fact that there is a wide range of company and patent solutions that cannot be comprehensively covered. The practical benefit of the conducted studies is related to the summary in a synthesized form of the directions in the development of modern electronic systems for servo- and stepper drive for positioning systems.

Keywords: servomotors, stepper motors, positioning systems, stepper drivers, servo controllers.

ВЪВЕДЕНИЕ

Съвременните достижения в технологията на позиционните електрическите задвижващи системи спомагат за значително намаляване на експлоатационните разходи и ги правят все по-предпочитано решение при реализиране на голям кръг от задачи изискващи прецизно и бързо позициониране. Основните характеристики на позициониращите системи са: подобрена ефективност, усъвършенстван контрол на процеса, адаптивност и гъвкавост, позволяваща им свързване към различни видове управляващи устройства като PLC, CNC, както и изграждане на специфични за даден потребител решения. Основно позициониращите системи биват изградени със сервозадвижващи системи и системи със стъпкови двигатели. Тези два основни вида, по същество съдържат в себе си електронна систе-

ма за управление (т. нар. драйвер), позиционен двигател и множество обратни връзки, основната от които е тази за следене на текущата позиция (енкодер). При изграждането на системите със стъпкови двигатели съществуват решения както с наличие на обратна връзка за позиция (хибридни стъпкови задвижвания), така и без обратна връзка за текуща позиция (конвенционални стъпкови задвижвания).

ИЗЛОЖЕНИЕ

Най-общо позициониращите системи могат да бъдат разглеждани като сервосистеми (съдържащи сервоконтролер, серводвигател и сензор за позициониране), конвенционални стъпкови задвижвания (състоящи се от драйвер и стъпков двигател) и хибридни стъпкови задвижвания (състоя-



щи се от серводрайвер, стъпков двигател и вграден сензор за позиция).

А. Тенденции в развитието на драйверните схеми и системи за стъпкови двигатели

Драйверните схеми за стъпкови двигатели могат да бъдат класифицирани в няколко категории, като обобщено са представени в таблица 1.

Табл. 1. Класификация на драйверните схеми за стъпкови двигатели

Класификационен признак	Функционални възможности и параметри
Начин на управление на двигателя	<i>Биполарно</i> (90% от разработваните драйверите в последните години) или <i>униполарно</i> управление
Наличие на обратна връзка	<i>Конвенционални</i> (без обратна връзка); <i>Хибридни</i> (с обратна връзка – оптичен или магнитен сензор за позиция).
Според структурата на предлаганата ИС	<i>само силова схема</i> (Power circuit); <i>само управляваща схема</i> (control logic or translator); <i>комбинирани</i> (Power circuit + translator)
Според мощността	<i>Маломощни</i> (напрежение до 36V и до 2A); <i>Средномощни</i> (напрежение до 50V и ток до 5A); <i>Мощни</i> (напрежение над 50V и ток над 5A);
Според броя микростъпки	<i>от 1:1 до 1:16;</i> <i>от 1:2 до 1:64;</i> <i>от 1:2 до 1:256</i> <i>от 1:16 до 1:64 (с вграден вътрешен модулатор от 256 микростъпки)</i>

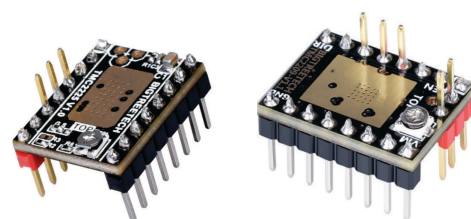
Основния тласък в развитието на драйверните схеми и системи за стъпковите двигатели бе даден от развитието на позициониращите системи вградени в 3Д принтерите. В последното десетилетие все повече водещи фирми в областта на електрониката и фирми производители на интегрални схеми разширяват своето портфолио от предлагани продукти и решения в тази област.

Основната насока в тази област е усъвършенстването на маломощните драйверни системи, като развитието е насочено към подобряване на схемотехниката, начините на управление и функционални въз-

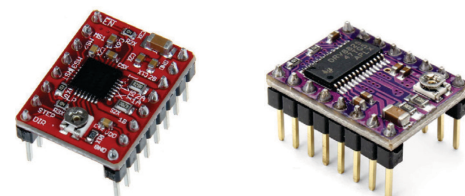
можности на драйверните схеми, предназначени основно за управление на стъпкови двигатели използвани в 3Д принтери.

Водещи фирми [1, 2 и 3], като например Allegro, Texas Instruments и Trinamic насочват своите усилия към създаване на драйверни схеми, които да отговорят на съвременните изисквания, като съчетават в една интегрална схема силова и управляваща схема. Това спомага да се получи драйверна схема с намалени геометрични размери (в диапазона 5x5 мм до 6x12 мм). Освен това непрекъснато се усъвършенстват: микростъпковия режим на управление, добавят се допълнителни функции (като например активно регулиране на тока по време на работа, прецизни регулатори на ток и напрежение за подобряване контрола и точността при микростъпковите режими и др.), както и начините за комуникации (освен стандартния STEP/DIR протокол, вече се добавя възможност за UART или SPI комуникация).

На фиг. 1 са представени най-разпространените видове маломощни интегрални схеми на водещите фирми – Texas Instruments, Allegro, Trinamic и STMicroelectronics.



а) Драйвер тип TMC2225 б) Драйвер тип TMC2209

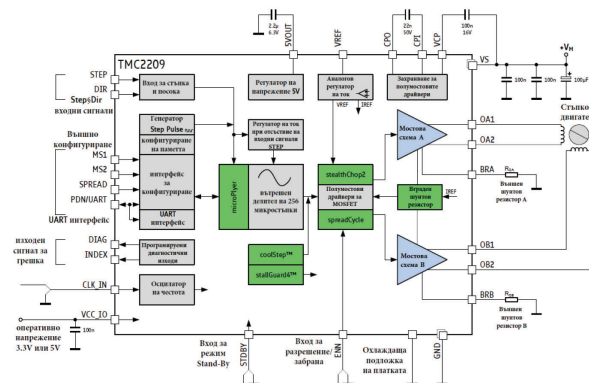


в) Драйвер тип A4988 г) Драйвер тип DRV8825

Фиг. 1. Разновидности на маломощни драйвери



В най-общи вид, структурата на драйверните схеми [4] има вида показан на фиг. 2. В изхода има две мостови схеми, предназначени за управлението на стъпковия двигател, както и шунтови резистора за следене на тока през намотките.



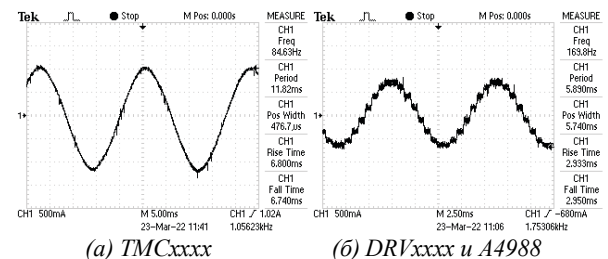
Фиг. 2. Вътрешна структура на маломощни драйвери

Табл. 2. Усъвършенствани функции и подобрени параметри [3]

Функции	Описание и възможности
Stealth Chop ² ™	Представява прецизен регулатор за напрежение с алгоритъм за намаляване на шума и вибрациите при движение и ускорение. Позволява по-бързо ускоряване и спиране на двигателя, както и намаляване на тока на покой (при липса на управляващи сигнали).
Spread Cycle™	Представява прецизно регулиране на тока на двигателя, цикъл по цикъл за получаване на по-високо динамично движение.
Micro Plyer™	Микростъпков интерполатор от 256 вътрешно получени микростъпки с цел получаване на синусоидален изходен ток при по-малка, външно зададена микростъпка, започващи от 1:1 до 1:128 при различните модели.
Stall Guard ⁴ ™	Безсензорно връщане в НОМЕ позициониране, което предпазва крайните изключватели и предупреждава в случай на претоварване на двигателя
Cool Step™	Тази функция използва измерване на StallGuard, за да адаптира тока на двигателя според натоварването, при което се получава по добра енергийна ефективност и намалява температурата на двигателя и на драйвера.
Вграден Step Pulse генератор	Използва се при приложения в които е необходимо двигателят да се движи за определено време и с определена скорост. Контролира се чрез UART интерфейс, като не осигурява рампа на ускорение и спиране.

Основно различията, при различните производители идват от вградените функции, които се развиват в следните насоки: ограничаване на тока на покой, намаляване на вибрационни и шумови характеристики, подобряване на деленето на микростъпките и усъвършенстване на този алгоритъм, подобряване на комуникационните възможности. В таблица 2 са дадени основните функции, които се развиват в последните години, част от които патентовани от фирма Trinamic.

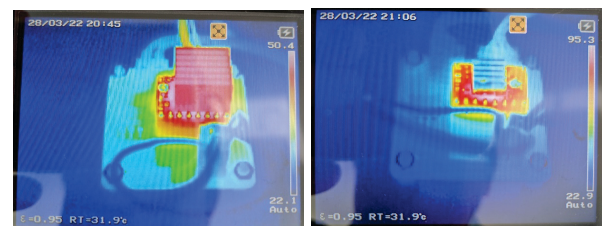
На фиг. 3 е показано действието на функцията MicroPlyer с използване на вградения интерполатор от 256 микростъпки [5]. В резултат на това, изходният ток е винаги със синусоидална форма, независимо от деленето на микростъпката.



(a) TMCxxxx (b) DRVxxxx и A4988

Фиг. 3. Изходен ток на драйверите в режим на 1:4 микростъпки при различни драйвери

На фиг. 4 е показано действието на функцията CoolStep с използване на прецизно регулиране на тока при работа [6]. В резултат на това, драйверите от серията TMC работят с 45% по-ниска температура, съответно намалена консумация на енергия.



а) драйвери TMCxxxx б) драйвери A4988 и DRVxxxx

Фиг. 4. Топлинен режим на драйверите в номинален работен режим



Б. Тенденции в развитието на драйверните схеми и системи за хибридни стъпкови задвижвания

Хибридните стъпкови задвижвания съчетават стъпков двигател [7, 8, 9], драйвер управляван от сервоконтролер и обратна връзка. Основните насоки при реализирането и предлагането на такъв тип системи са усъвършенстване на: вида и типа на обратната връзка, чрез използване на различни видове сензори за позиция; функциите за управление (използване на похватите и функциите дефинирани в табл. 2; комуникационни интерфейси, към стандартния STEP/DIR протокол, софтуер за програмиране и настройка, както и добавяне на банки памет за запис и извеждане на параметри – табл. 3.

Табл. 3. Класификация на хибридни стъпкови задвижвания

Класификационен признак	Функционални възможности и параметри
Размер и въртящ момент	Въртящ момент (0,2÷20) N.m Размер на двигателя (NEMA size) – от NEMA8 до NEMA42
Вид и място на обратната връзка	По вид - Фоторастерен преобразувател (ФРП) или магнитен енкодер (с елемент на Хол) По място - Вграден или външен Резолуция – до 5000 имп/об.
Вид и място на драйвера	Отделен серводрайвер, базиран на DSP или ARM cortex (Cortex M4) процесор и дискретни транзистори или специализирана драйверна ИС Модулно интегриран сервоконтролер към енкодера и двигателя – всичко в един корпус Като платка, с всички необходими елементи, с възможност за монтаж върху съществуващи вече решения;
Според допълнителни функции	Използване на сервоуправление, комбинирано със съвременните функции при управлението на конвенционалните стъпкови задвижвания дадени в табл. 2
Комуникационен интерфейс	Конвенционален STEP/DIR интерфейс; Използване на индустриален комуникационен интерфейс от следните типове: CAN, CANopen, EtherNet/IP, ModBus, FieldBus, RS485

На фиг. 5 са показани различните видове хибридни стъпкови задвижвания. Могат да бъдат във вариант като интегриран модул, а така и като отделни модули – драйвер и двигател с енкодер. С прецизното управление посредством затворена с обратна връзка сервосистема, интегрираните драйвери осигуряват енергийно ефективно и много добро технико-икономическо решение, когато към позиционираща система има изисквания относно цена-качество.



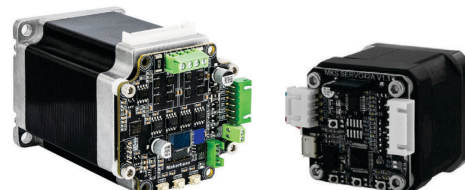
а) драйвер на Trinamic б) драйвер на LeadShine



в) драйвер на Schneider Electric

Фиг. 5. Драйвери за хибридни стъпкови задвижвания

На фиг. 6 са показани системи за хибридно стъпково задвижване с възможност за усъвършенстване на съществуващи, вече изградени задвижвания [10].

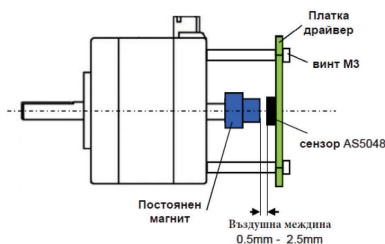


а) драйвер за NEMA23 б) драйвер за NEMA17

Фиг. 6. Драйвери за хибридни стъпкови задвижвания за модифициране на съществуващи стъпкови задвижвания



Модификацията позволява добавянето на постоянен магнит на вала на двигателя (двигателя трябва да е с двойна ос) и платка, която се монтира директно към двигателя [11], както е показано на фиг. 7. Освен това драйверите са с комуникационен интерфейс по CANOpen или RS485, както и 14-битов магнитен енкодер. Основните предимства на този тип задвижвания са получаването на (30-50)% по-високи обороти на въртене на стъпковия двигател, наличието на следене и поддържане на текущата позиция, по-малките габаритни размери и цена спрямо класическите сервосистеми, възможност за модернизиране на съществуващи стъпкови позиционни задвижвания чрез добавяне на магнитен енкодер и платка специално разработена за дадения корпус на стъпковия двигател.



Фиг. 7. Монтиране на серводрайвер с магнитен енкодер към съществуващо стъпково задвижване

Недостатъците на този етап са все още ниските динамични свойства на предлаганите системи и по-ниските обороти и прецизност спрямо сервозадвижващите позициониращи системи.

В. Тенденции в развитието на драйверните схеми и системи за хибридни стъпкови задвижвания

Мобилните роботи, както и електрическата мобилност дават основните насоки, при развитието и новите тенденции в сервозадвижващите системи [12, 13, 14]. Общите характеристики на такъв тип приложения включват подобряването на точността на позициониране, разширяване на обхвата на действие, възможностите за ко-

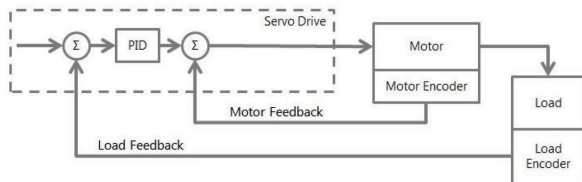
муникация, както и подобряване на масо-габаритните свойства. В таблица 4 са представени основните тенденции в развитието на този тип системи. Подобряването на точността на позиционирането се извършва посредством [14] двойна универсална обратна връзка – фиг. 8. Това се използва машини и системи за увеличаване на точността и елиминиране на възможни луфтове в механичната система. Енкодера, интегриран в двигателя осигурява плавна, контролирана скорост, при промяна на натоварването, докато втория енкодер монтиран към товара, осигурява прецизно позициониране при товара, независимо от луфтовете или когато има нетвърди трансмисионни компоненти.

Табл. 4. Усъвършенствани функции и подобрени параметри при сервозадвижващите системи

Функции	Описание и възможности
Двойна обратна връзка	Представява съчетание на две обратни връзки по позиция – едната интегрирана в двигателя, другата монтирана към товара.
Универсална обратна връзка по позиция	Представява усъвършенстван вариант на двойната обратна връзка, като дава възможност за използване на различни по вид енкодери - инкрементални А/В, квадратични, както и различни протоколи за абсолютна обратна връзка като BiSS-C, Endat, SSI и др.
FlexPro	Проектиране на многомодулна система за свързване в паралел или за създаване на многоосово сервозадвижване в един корпус.
Автоматична настройка на ОБ за скорост и позиция	Тази функция се интегрира в софтуера за програмиране и настройка на сервоконтролера. Основното предимство е намаляването на времето за настройка и даването на добра отправна точка при ръчна настройка.
многоосов FlexPro модул	Тази функция интегрира решения за управление на 2-, 3- или 4- оси в един модул, което намалява масо-габаритните свойства и увеличава функционалността на модула. Прилага се при портални CNC решения, делта роботи, роботизирани ръце и мобилни роботи.
SSI енкодер	Функцията SSI представлява синхронен сериен интерфейс, който се използва като протокол за обратна връзка от абсолютен енкодер за обратна връзка. Тези протоколи включват BiSS-C, EnDat, Hiperface и Tamagawa..



Друга разновидност и тенденция в развитието на този вид системи е въвеждането на универсална втора обратна връзка (Dual Universal Feedback).



Фиг.8. Сервозадвижваща система с двойна обратна връзка

Основното предимство на тази технология е възможността за гъвкавост при настройването на обратната връзка в сервосистемите. Като базов пример може да се посочи, случаят когато двигателя има интегриран енкодер има един тип, докато линейното движение на товара използва различен тип обратна връзка. Вместо да се променя вида на енкодерите, за да съответства на другия, този подход позволява съчетаване на различни системи без нужда от идентични компоненти.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Направения преглед и критичен анализ на тенденциите в развитието на основните три вида задвижващи системи води до следните няколко основни извода: основен тласък в развитието на драйверите за стъпкови двигатели има развитието на 3Д принтиращите системи, като в частност се подобряват и усъвършенстват маломощните драйверни системи с техните функционални възможности и параметри; използването на хибридни задвижвания позволява усъвършенстването на съществуващи позициониращи системи със стъпкови двигатели, като е възможно запазването на двигателя и използването на интегрирани решения, които подобряват точността и скоростта при движение; многоосовите сервозадвижвания, двойната обратна връзка и усъвършенстваните комуникационни протоколи позволяват универсалност, лесна настройка и съгласуване на параметрите на индустриалните сервосистеми.

БЛАГОДАРНОСТ

Авторът изказва своята благодарност към всички рецензенти за техните съвети и предложения за подобряване на тази публикация. Авторът изказва своята благодарност на проект BG05M2OP001-1.002-0023 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] <https://www.allegromicro.com/en/products/motor-drivers/stepper-drivers>
- [2] <https://www.ti.com/product/DRV8825>
- [3] <https://www.trinamic.com/products/integrated-circuits/>
- [4] <https://www.trinamic.com/products/integrated-circuits/details/tmc2209-la/>
- [5] Prodanov, D. Dankov, “Reliability of low-power stepper motor drivers”, XXXI International Scientific Conference Electronics - ET2022, 13 - 15 September 2022, Sozopol, Bulgaria, pp. 1 – 4
- [6] P. Prodanov, M. Floreva, D. Dankov, “Research of low-power stepper motor drivers”, XXXI International Scientific Conference Electronics - ET2022, 13 - 15 September 2022, Sozopol, Bulgaria, pp. 1 – 4.
- [7] <https://www.trinamic.com/products/integrated-circuits/details/tmc2160-ta/>
- [8] <https://www.leadshine.com/products/stepper/integrated-stepper-motor.html>
- [9] <https://www.se.com/ww/en/product-range/7208-lexium-sd2-motors/12367270011-stepper-drives/?parent-subcategory-id=2955&filter=business-1-industrial-automation-and-control&N=2804762399#overview>
- [10] https://makerbase3d.com/product/makerbase-mks-servo57d-pcba-nema23-closed-loop-stepper-motor-driver-cnc-3d-printer-for-gen_1-foc-quiet-and-efficient/
- [11] https://ams.com/documents/20143/36005/AS5048_MB_UG000373_1-00.pdf
- [12] <https://www.fanuc.eu/bg/bg/%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BB%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F>
- [13] Khan I., H. Mokhlis, N. Mansor, H. Azil, L. Awalin, Li Wang, “New trends and future directions in load frequency control and flexible power system: A comprehensive review”, Alexandria Engineering Journal, Volume 71, 2023, pp. 263-308, ISSN 1110-0168.
- [14] <https://www.a-m-c.com/servo-drive-trends-for-2022/>
- [15] <https://endat.heidenhain.com/endat3>



ОБРАБОТВАНЕ НА ЗЪБНИ ПРОФИЛИ ВЪРХУ МАШИНИ С ЦИФРОВО ПРОГРАМНО УПРАВЛЕНИЕ

MACHINING OF TOOTH PROFILES ON CNC MACHINES

Hristo Hristov Yakimov
Technical University - Gabrovo

Irina Stefanova Alexandrova
Technical University – Gabrovo

Yosif Mitev Mityev
Technical University - Gabrovo

Abstract

Conventional methods of tooth machining using worm modular milling cutters, gear wheels and gear combs have common disadvantages - they require specialized equipment, are characterized by complex readjustment and relatively low productivity, which are eliminated in tooth turning. This paper views the possibilities for machining tooth profiles by means of tooth turning on CNC turning-milling machines. A new version of the kinematics of the process upon cutting inclined teeth has been implemented, where the feed is in the direction of the tooth, no correction in the angular speed is required and a tooth-turning tool profiled according to the profile of the machined surface is used. Meshing of a tooth pair with crossed axes is reproduced. As a result of the crossing, slipping of the profiles occurs, which is the main cutting movement. The cutting speed, as a determining mode factor, can vary widely and depends on a number of design and technological parameters. Single-factor experiments have been conducted to determine the influence of the conditions of the implementation of the tooth turning process (the crossing angle of the tool axes and the workpiece, determining the magnitude of the cutting speed, and feed rate) on the quality parameters of the machined surfaces (tooth profile deviation, tooth direction deviation, accumulated pitch error, largest pitch difference and radial runout error) and the corresponding graphical dependencies have been constructed. A 7-12 degree of accuracy of the machined tooth profiles has been ensured.

Key words: tooth machining; tooth turning; tooth-turning tool; CNC turning-milling machines

ВЪВЕДЕНИЕ

Зъбните профили се формират от периодично повтарящи се сложни повърхнини и налагат приложението на специални методи или инструменти за изработването им, което води до развитие на отделен клас специализирани машини и инструменти. Необходимостта от концентрация на операциите налага търсенето на възможности за интегриране на тези методи към съвременните машини, тип обработващ център.

Като перспективен метод за обработка на цилиндрични зъбни колела, зъбоструговането е насърчавано от много търговски дружества, като Gleason, Mitsubishi и Prawema [1-3]. Проведени са изследвания,

посветени на теорията и приложението на зъбоструговането и насочени към кинематиката на процеса и особеностите на стружкообразуването. Създадени са теоретични методи за профилиране на зъбостругови инструменти.

В редица статии са представени изследвания на конструкцията на зъбоструговия инструмент, на ъгъла на рязане и на силата, необходима за плъзгане на зъбните профили чрез числени методи [4]. Изследвано е както предварителното, така и окончателното обработване на индукционно закалени зъбни колела [5].

Разработките върху процеса зъбоструговане не обхващат в достатъчна степен

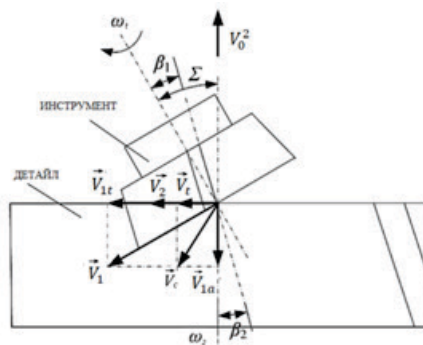


модификацията на профила на зъба. На практика правилната модификация на зъба може да помогне за намаляване на чувствителността на зъбните предавки към грешки в процеса, което е много важно в съвременната индустрия за изработване на зъбни колела [6,7].

Цел на настоящата разработка е изследване на технологичните възможности за реализация на процеса зъбоструговане върху струго-фрезови обработващи центри и определяне на точностните характеристики на обработените чрез този метод зъбни профили.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Нарязването на зъбни колела чрез зъбоструговане се основава на метода центроидно обхождане, реализиран посредством зацепване на двойка зъбни колела с кръстосани оси. При този метод (фиг.1) детайлът и инструментът извършват строго синхронизирани въртеливи движения със скорости ω_1 и ω_2 .



Фиг. 1 Схема на процеса зъбоструговане

В резултат на кръстосването на осите на инструмента и обработвания детайл под ъгъл Σ е налице относително плъзгане между профилите на зъбите на инструмента и детайла, което е главното движение за процеса. Подавателното движение се извършва обикновено от инструмента по оста на ротация на заготовката.

Стойността на скоростта на рязане V_c е от съществено технологично значение, тъй

като тя определя трайността на инструмента и е в зависимост от физико-химичните свойства на обработвания материал. Определящите конструктивни фактори са известни, докато за технологичните има много малко информация.

Скоростта на рязане V_c се определя по следната зависимост:

$$V_c = \omega_t \cdot r_t \cdot \sin \Sigma \text{ [m/min]},$$

където r_t е радиусът на инструмента.

Качеството на обработените профили и производителността на процеса зъбоструговане зависят от скоростта на рязане и от подавателната скорост. За оценка на влиянието на тези фактори върху точностните характеристики на изработени чрез зъбоструговане зъбни профили върху струго-фрезови обработващ център ТМ2500 са проведени са еднофакторни експерименти. В качеството на параметри за оценка на точността са избрани отклонението от профила на зъба, отклонение от направлението на зъба, натрупаната грешка на стъпката, най-голямата разлика в стъпката и грешката от радиално биене. Избраните управляващи фактори са ъгълът на кръстосване Σ и подавателната скорост.

Ъгълът на кръстосване Σ се формира от ъглите на наклон на зъбите на детайла β_2 и на инструмента β_1 [1-3]. За експериментите е избран диапазон за изменение от 10° до 30° , което съответства на зъбни колела с наклонени зъби.

Диапазонът на подавателната скорост е избран от 100 mm/min до 500 mm/min с оглед търсене на оптимална стойност, осигуряваща зададената точност при запазване на гладкост и производителност.

Експерименталните изследвания на процеса зъбоструговане са проведени върху опитна уредба (фиг. 2), включваща струго-фрезови обработващ център ТМ2500, необходимата екипировка за установяване на



детайла и режещи инструменти. Те са реализирани в условията на лаборатория С1.2. “CAD/CAM системи за проектиране и производство на високо-технологични продукти” в Центъра за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии”.



Фиг. 2 Опитна уредба

Режещият инструмент е зъбодълбачно колело с модул $m = 0,8 \text{ mm}$, брой на зъбите $z = 60$ и ъгъл на наклон на зъбите $\beta_1 = 0^\circ$.

Обработеният детайл е зъбно колело с външни зъби от алуминиева сплав D16T с модул $m = 0,8 \text{ mm}$, брой на зъбите $z = 32$ и ъгъл на наклон на зъбите съответно $\beta_2 = 10^\circ; 15^\circ; 20^\circ; 25^\circ$ и 30° . Широчината на зъбния венец е 6 mm , а външният диаметър D_v е определен от съответната зависимост според ъгъла на наклон на зъбите.

Резултатите от експериментите са представени в графичен вид, представляващ функция на съответният параметър на точността от ъгъла на кръстосване и подавателната скорост (фиг. 3 ÷ фиг. 10). Получените резултати са апроксимирани с прави линии.

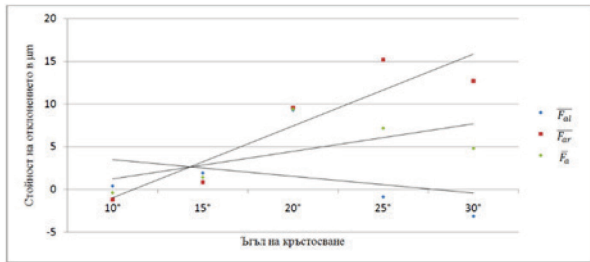
На фиг. 3 е представено влиянието на ъгъла на кръстосване върху отклонението на профила на зъба, съответно за левия профил - F_{AL} , за десния профил - F_{AR} и средното отклонение - F_A . С увеличаване на ъгъла на кръстосване се наблюдава тенденцията за увеличаване на отклоненията, респективно за намаляване на точността на обработения профил, като тя се изменя в диапазона от 9

до 12 степен на точност. Характерно е, че нарастването на отклонението е в различна посока за двете страни на зъба - за лявата страна F_{AL} нараства в отрицателна посока, а за дясната F_{AR} нараства в положителна посока. Двете изменения не се компенсират, като средната стойност F_A нараства с $8 \mu\text{m}$ за изследвания диапазон.

Това влияние може да се обясни с две причини. От една страна, увеличаването на ъгъла на кръстосване води до увеличаване на скоростта на относително приплъзване на двата профила. От друга страна, при различните ъгли се използва един и същ инструмент с 0° наклон на зъбите, поради което профилът му не съответства на профила на зъба.

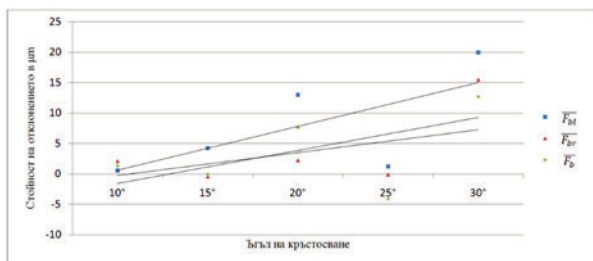
Характерът на изменение на отклонението от направлението на зъба F_v в зависимост от ъгъла на кръстосване е представен на фиг. 4. Наблюдава се увеличаване на F_v с увеличаване на ъгъла на кръстосване. При минимален ъгъл от 10° отклонението е около $2 \div 3 \mu\text{m}$, при 30° нараства $3 \div 4$ пъти до $15 \mu\text{m}$. Това изменение съответства на 7 - 12 степен на точност. Характерът и големината на отклонението на левия и десния профил са приблизително еднакви.

Увеличаването на отклонението от направлението на зъба при увеличаване на ъгъла на кръстосване се обяснява с факта, че зъбите преминават от тип „наклонени” в тип „винтови”, тоест образуващата на зъба се променя от права във винтова линия. При съставянето на управляващата програма за зъбонарязването е прието, че инструментът се движи по права линия. С увеличаването на ъгъла тази траектория се отличава от действителната винтовата линия на зъба. Следователно при работа с по-големи ъгли на кръстосване от 20° е желателно траекторията на инструмента да се промени от права в траектория, съответстваща на действителна винтова линия на зъба, като това ще намали отклоненията от направлението на зъба.

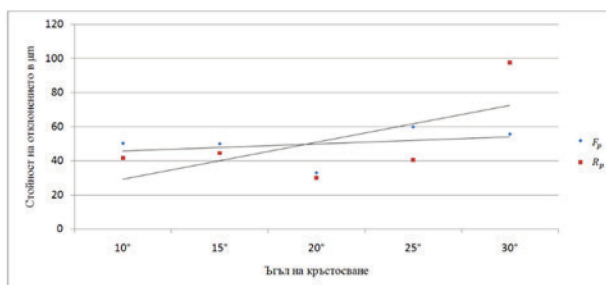


Фиг. 3. Влияние на ъгъла на кръстосване върху отклонението на профила на зъба

Параметрите, характеризиращи отклонението в стъпката на зъбите (натрупана грешка на стъпката F_p и най-голямата разлика в стъпката R_p), във функция от ъгъла на кръстосване са представени на фиг. 5. Наблюдава се увеличаване на F_p с увеличаване на ъгъла на кръстосване. При минимален ъгъл от 10° отклонението е около $30 \mu\text{m}$, при 30° нараства 2 пъти до $70 \mu\text{m}$. Най-голямата разлика в стъпка R_p показва тенденция за нарастване приблизително с $60 \mu\text{m}$. Тези изменения съответстват на 7 - 12 степен на точност.

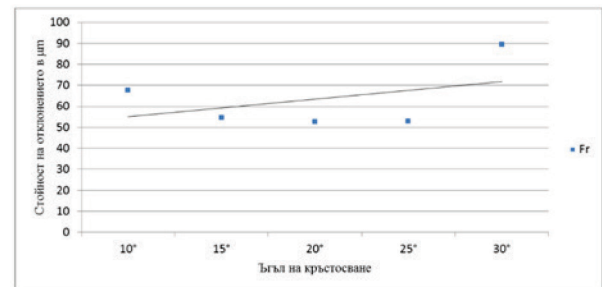


Фиг. 4. Отклонение от направлението на зъба в зависимост от ъгъла на кръстосване



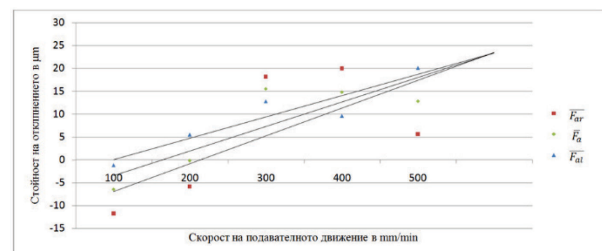
Фиг. 5. Отклонение в стъпката на зъбите - натрупана грешка на стъпката и най-голяма разлика в стъпката

Изменението на грешката от радиално биене F_r в зависимост от ъгъла на кръстосване е представено на фиг. 6. Получените стойности от $67 \mu\text{m}$ до $89 \mu\text{m}$ съответстват на 8 степен на точност. Стойностите на радиалното биене се формират основно от грешки при установяване на детайла.



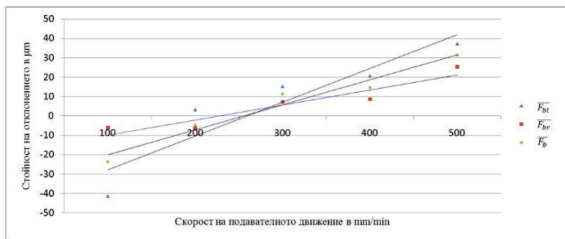
Фиг. 6. Грешка от радиално биене

Влиянието на подавателната скорост върху отклонението на профила на зъба (фиг. 7) е ясно изразено, като изменението на скоростта от 100 до 500 mm/min води до увеличаване на F_a 4 пъти. Получените резултати съответстват на 8-11 степен на точност. Зависимостта се наблюдава както при левия, така и при десния зъбен профил.



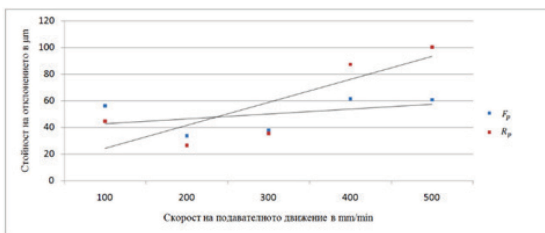
Фиг. 7. Влияние на подавателната скорост върху отклонението на профила на зъба

В отклонението от направлението на зъба (фиг. 8) се наблюдава нарастване на F_b с увеличаване на подавателната скорост. При подавателна скорост 100 mm/min , отклонението е $20 \mu\text{m}$ с отрицателен знак, а при нарастване на скоростта до 500 mm/min F_b достига до $37 \mu\text{m}$. Това изменение отговаря на 7-12 степен на точност.



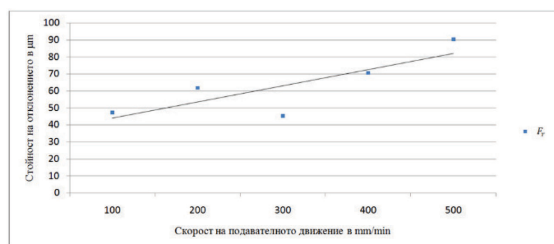
Фиг. 8. Отклонение от направлението на зъба

Зависимостите за отклоненията в стъпката са показани на фиг. 9. Натрупаната грешка на стъпката F_R зависи минимално от скоростта на подавателното движение, като стойността ѝ се променя в рамките на 15 μm , което съответства на 7 степен на точност. Най-голямата разлика в стъпката R_p нараства до 70 μm с увеличаване на подавателната скорост.



Фиг. 9. Отклонение в стъпката на зъбите-натрупана грешка на стъпката и най-голяма разлика в стъпката между два зъба, които не са съседни

Грешката от радиално биене F_R в зависимост от скоростта на подавателното движение (фиг. 10) се изменя линейно, като нараства с 45 μm за целия диапазон. Получените стойности от 49 μm до 90 μm съответстват на 12 степен на точност.



Фиг. 10. Грешка от радиално биене

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Доказана е възможността за реализиране на процеса зъбоструговане върху струго-фрезови обработващ център, като е анализирано влиянието на ъгъла на кръстосване и на подавателната скорост върху точностните параметри на изработени зъбни профили (отклонение от профила на зъба, отклонение от направлението на зъба, натрупана грешка на стъпката, най-голяма разлика в стъпката и грешка от радиално биене).

Получените резултати доказват, че методът зъбоструговане се характеризира с достатъчна точност за предварително и в определени случаи и за окончателно обработване на зъбни профили.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kobialka C. Contemporary Gear Pre-Machining Solutions. AGMA Technical Paper, American Gear Manufacturers Association, 12FTM11, 2012.
- [2] Kreschel J. Gleason Power Skiving: Technology and Basics., Ludwigsburg: Gleason Company Publication, 2012.
- [3] Radzevich S. Gear Cutting Tools. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [4] Spath D, Huhsam A. Skiving for high-performance machining of periodic structures. Annals of the CIRP 2002; 51(1).
- [5] Sugimoto T, Ishibashi A, Yonekura M. Performance of skiving hobs in finishing induction hardened and carburized gears. Gear Technology 2003;34–41.
- [6] Fuentes A, Gonzalez-Perez I. Mathematical Definition and Computerized Modeling of Spherical Involute and Octoidal Bevel Gears Generated by Crown Gear. Mechanism and Machine Theory 2016; 106: 94-114.
- [7] Fuentes A, Iserte JL, Gonzalez-Perez I, Sanchez-Marin FT. Computerized Design of Advanced Straight and Skew Bevel Gears Produced by Precision Forging. Comput Methods Appl Mech Eng 2011; 200(29–32):2363–2377.



МУЛТИСЕНЗОРНА СИСТЕМА ЗА ОКАЧЕСТВЯВАНЕ НА СЛЪНЧОГЛЕДОВО МАСЛО НА БАЗАТА НА „ЕЛЕКТРОНЕН НОС“

MULTISENSOR SUNFLOWER OIL QUALITY ASSESSMENT SYSTEM BASED ON “ELECTRONIC NOSE”

Stefan Ivanov

Technical University of Gabrovo

Todor Todorov

Technical University of Gabrovo

Toshko Nenov

Technical University of Gabrovo

Abstract

In the current paper is presented a multi-sensor system for recognition and classification of food products based on a sensor module with three independent metal oxide gas sensor elements, which is characterized by low energy consumption. Based on experimental data obtained with the multi-sensor system, an artificial neural network was trained. The neural network recognizes the different classes of sunflower oil with very good accuracy.

Keywords: gas sensors; electronic nose; multisensor system .

ВЪВЕДЕНИЕ

Газовите сензори имат все по-голямо значение в съвременното индустриално общество, тъй като се използват в широк спектър от области и приложения. [1, 2]. Необходимо е да се отбележи, че разработването на селективен сензор, който да реагира само на един газ е сложна задача. Затова перспективите за разширяване на приложенията на газовите сензори се свързват основно с успехите в обработката на сигналите от тях. Особено място при това намират мултисензорните системи, предлагащи съвършено нов подход при измерването на многокомпонентни газове среди с помощта на неселективни сензори.

Под термина „електронен нос“ се разбира аналитично устройство, състоящо се от неселективни газове сензори, притежаващи кръстосана чувствителност и методи за математическа обработка на сигналите от него за качествена и количествена оценка на газове, пари, аромати и миризми [3].

Провеждат се изследвания за приложения на електронния нос в различни области

от човешката дейност. Поради предимствата си при откриване и идентифициране на газове той може да се използва в много области, като мониторинг на качеството на храните, медицинска диагностика, откриване на опасни газове, селско стопанство, опазване на околната среда, откриване на взривни вещества и наркотици и др. [4-6].

Оценката на автентичността на храните стана много важна през последните години, главно поради проблема с фалшифицирането. Това налага нови инструменти за проверка на качеството на храните, преди и след обработка. Електронният нос се явява обещаващ инструмент за справяне с тези проблеми, тъй като може да открива и разграничава прости и много сложни миризми едновременно. Електронният нос може да се използва за откриване на нива на фалшификация в храни или различни концентрации на специфични летливи съединения [7-9].

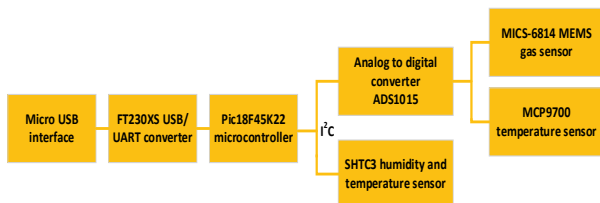
В настоящата работа е представена мултисензорна система за разпознаване и класификация на хранителни продукти на базата на сензорен модул с три независими



металооксидни газови сензорни елемента, който се характеризира с ниска консумация на енергия. Мултисензорната система е използвана за класификация на слънчогледово масло на базата на изкуствена невронна мрежа.

СЕНЗОРЕН МОДУЛ

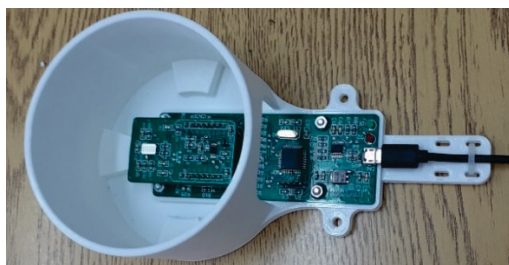
Разработен е сензорен модул за събиране на данни от реакцията на газовите сензори (фиг. 1). Сензорният модул е реализиран на базата на газов сензор MICS-6814 [10] за откриване на три вида газове: въглероден оксид (CO), азотен диоксид (NO₂) и амоняк (NH₃).



Фиг. 1. Блокова схема на сензорния модул

MICS-6814 съдържа три чувствителни резистивни елемента от метален оксид. Те променят съпротивлението си при наличие на газове, към които са чувствителни. Окислителните газове, като озон или азотен диоксид, причиняват увеличаване на съпротивлението на чувствителните елементи, докато редуциращите газове, като въглероден оксид или летливи органични съединения, причиняват намаляване на съпротивлението. Модулът е затворен в специално проектиран корпус, показан на фиг. 2.

За получаване на данни от сензорния модул се използва стъклен съд, в който се наливат тестовите проби от слънчогледово масло.

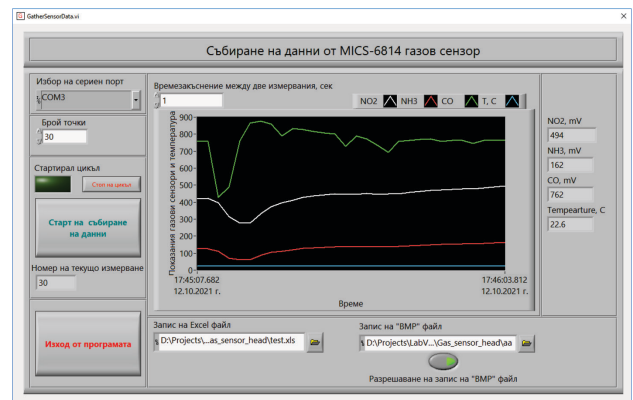


Фиг. 2. Сензорен модул

След това сензорният модул се поставя върху стъкления съд и започват измервания. По време на измерванията, стъкленият съд може да бъде поставен върху нагревателна плоча, която се контролира да поддържа температура между 40°C и 50°C.

Разработена е програма за персонален компютър за събиране на данни с помощта на LabVIEW за четене и съхраняване на данните, получени от сензора. След успешни тестове, програмата беше компилирана като самостоятелно приложение (фиг. 3).

Програмата се характеризира с няколко основни свойства, като интуитивен потребителски интерфейс, графично представяне на получените данни и възможност за съхраняването им в Excel файл. Освен това програмата позволява визуализиране на данните в BMP изображения и съхраняването им в Excel файл.



Фиг. 3. Програма за събиране на данни

СЪБИРАНЕ НА ДАННИ ЗА СЛЪНЧОГЛЕДОВО МАСЛО

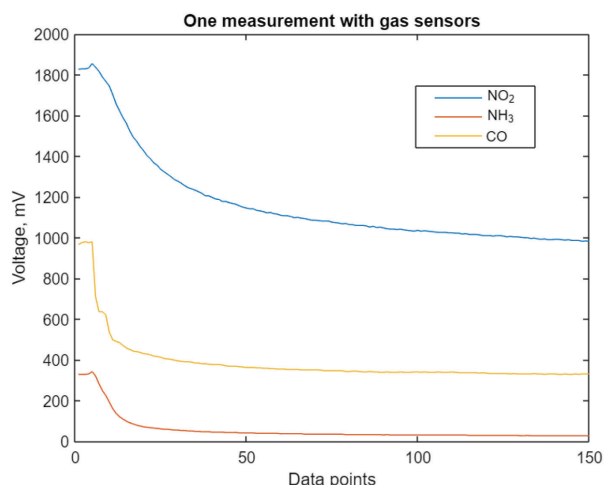
За настоящото изследване са използвани различни видове проби от слънчогледово масло от технологичния процес на фирма Олива АД – екстракционно, филтрирано, дегумирано и рафинирано. В табл. 1 са показани използваните проби слънчогледово масло.



Таблица 1. Типове слънчогледово масло

Име на класа	Номер на класа	Тип слънчогледово масло
D class	4	Дегумирано
E class	3	Екстракционно (нефилтрирано)
F class	2	Филтрирано
P class	1	Рафинирано (Продукт за пазара)

Взети са двадесет тестови проби от всеки клас масло, като чрез сензорния модул са получени данни за маслото във всяка проба.



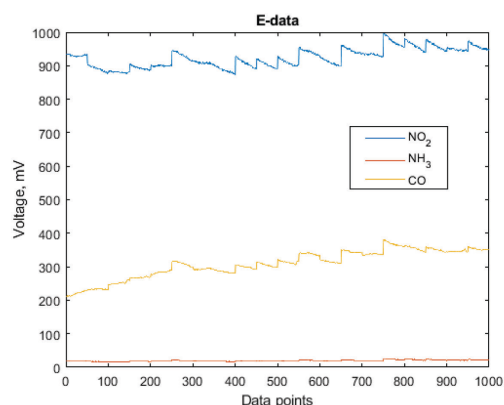
Фиг. 4. Едно измерване със сензорите, преминаващи към устойчиво състояние

Целият процес на измерване продължава 3 минути, но само данните от последните 100 секунди се използват за получаване на средните стойности на изходния сигнал на сензора в mV.

Показанията на сензора бяха запазени в отделни файлове. Тъй като сензорният модул изисква известно време, за да установи и стабилизира своите показания (както е показано на фиг. 4), бяха събрани общо 150 точки на измерване, като последните 50 точки се считат за стабилни стойности. От

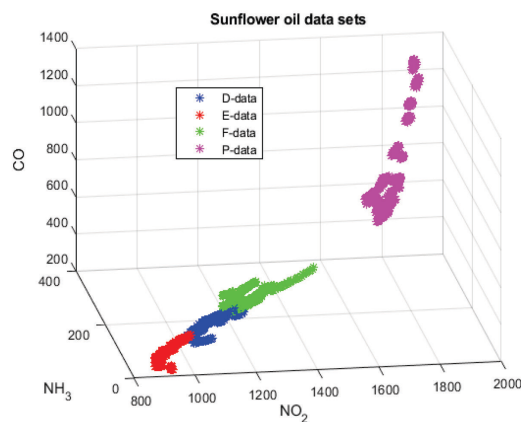
20 файла с данни, генерирани за всеки клас, само последните 50 точки бяха извлечени и комбинирани, за да се създаде нов файл, съдържащ обобщените данни за този клас. В резултат на това бяха създадени четири файла с данни за обучение за четирите класа слънчогледово масло.

На фиг. 5 графично са представени данните, събрани за слънчогледово масло клас E, използвани за обучение на изкуствената невронна мрежа.



Фиг. 5. Последни 50 придобити точки от 20 измервания за масло клас E

На фиг. 6 е представена визуализация на данните за обучението за четирите класа. Графиката показва, че класовете D, E и P са разположени в непосредствена близост един до друг, което потенциално може да доведе до неточности в разпознаването им.

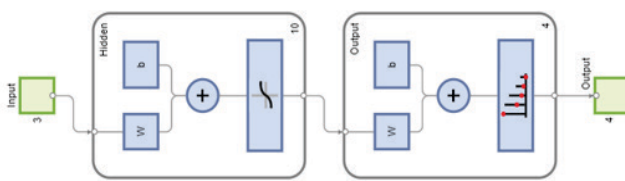


Фиг. 6. Визуализация на пространствени места от различни класове



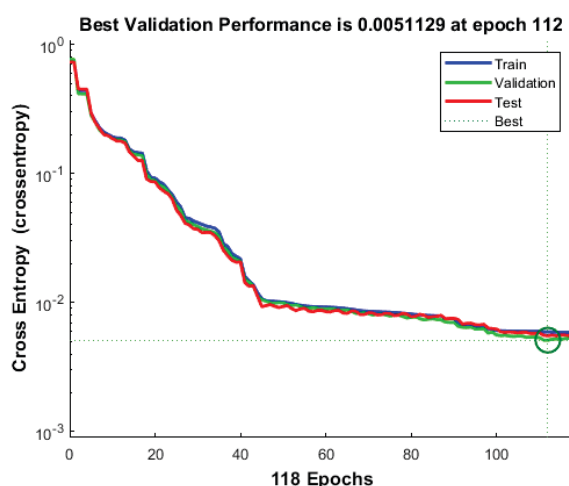
ОБУЧЕНИЕ НА НЕВРОННАТА МРЕЖА

За разпознаване на отделните класове е използвана класификационна невронна мрежа. Тази невронна мрежа има един скрит слой, състоящ се от 10 неврона, както и изходен класификационен слой, способен да класифицира четирите класа данни. Структурата на невронната мрежа е показана на фиг. 7.



Фиг. 7. Структура на невронната мрежа за класификация

Невронната мрежа беше обучена с помощта на извадка от 4000 вектора, които описват четирите класа масло. От общата извадка 70% са използвани за обучение, докато останалите са използвани за целите на валидиране и тестване. Мрежата беше обучена в продължение на 112 итерации (фиг. 8).



Фиг. 8. Графиката на процеса на обучение на невронната мрежа

ОЦЕНКА НА РАБОТАТА НА НЕВРОННАТА МРЕЖА

След като една невронна мрежа бъде обучена от набор от данни, нейната производителност може да бъде оценена с помощта на различни показатели, които измерват колко точно прогнозира правилния изход.

Изборът коя метрика да се използва зависи от конкретната задача и изискванията на приложението. Точността (Accuracy) измерва дела на правилно класифицираните проби спрямо общия брой проби. Въпреки това, само по себе си точността може да не е достатъчна в определени ситуации, като например когато един клас е значително по-разпространен от другия или когато цената на фалшиво положително или фалшиво отрицателно прогнозиране е различна. В такива случаи често се използват метриците прецизност и Recall. Прецизността (Precision) измерва дела на правилно прогнозираните положителни проби от всички прогнозираните положителни проби, докато метриката Recall измерва дела на правилно прогнозираните положителни проби от всички действителни положителни проби. Метриката F1 score е често използван показател, който комбинира както прецизност, така и Recall в една стойност. Това е средната хармонична стойност на прецизността и Recall и осигурява балансирана мярка на двата показателя. Всички тези показатели се основават на броя на истински положителни, истински отрицателни, фалшиви положителни и фалшиви отрицателни резултати, които могат да бъдат обобщени в матрица на резултатите. Матрицата на резултатите е таблица, която показва броя на правилно и неправилно класифицирани проби за всеки клас и може да даде представа къде невронната мрежа прави грешки. Матрицата на резултатите за обучената невронна мрежа е представена на фиг. 9.

Другите показатели имат стойности, показани в табл. 2.



Output Class	1	2	3	4	
1	1000 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
2	0 0.0%	991 24.8%	0 0.0%	11 0.3%	98.9% 1.1%
3	0 0.0%	0 0.0%	989 24.7%	10 0.2%	99.0% 1.0%
4	0 0.0%	9 0.2%	11 0.3%	979 24.5%	98.0% 2.0%
	100% 0.0%	99.1% 0.9%	98.9% 1.1%	97.9% 2.1%	99.0% 1.0%
	a	b	c	d	
	Target Class				

Фиг. 9. Матрица на резултатите на обучени ANN с възможности за класификация

Таблица 2. Стойности на основните показатели за оценка на ANN

Метрика	Стойност
Точност (Accuracy)	0.9949
Прецизност (Precision)	0.9898
Recall	0.9898
F1Score	0.9898

ТЕСТВАНЕ СЪС СИМУЛИРАНИ ДАННИ

За оценка на ефективността на обучената невронна мрежа бяха използвани симулирани стойности с добавен случаен шум. Средните показания на всеки сензор в MICS-6814 за всеки клас масло послужиха като основа за генериране на симулираните данни.

За изчисляване на средните показания на сензора за всеки клас масло е използвана следната формула

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (1)$$

където N е брой на осреднените стойности на x.

В табл. 3 са представени средните стойности на отчитане на сензора в mV за всеки от различните класове.

Таблица 3. Средни стойности

Клас	NO ₂ , mV	NH ₃ , mV	CO, mV
D клас	1061.58	34.642	423.78
E клас	923.53	19.55	308.47
F клас	1192.64	53.25	519.47
P клас	1747.47	220.67	923.44

Добавеният шум беше генериран с мощта на стандартните отклонения на показанията на сензора за всеки тип масло. За изчисляване на стандартното отклонение беше използвана формула (2).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (2)$$

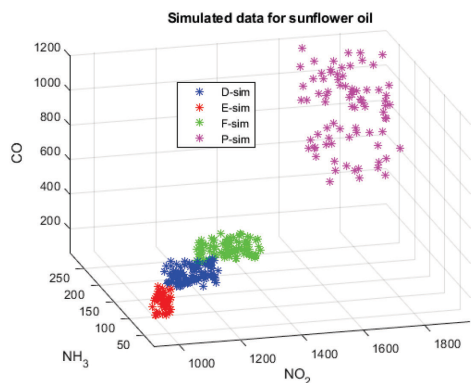
Резултатите за стандартните отклонения са представени в табл. 4.

Таблица 4. Стандартни отклонения

Клас	NO ₂ , mV	NH ₃ , mV	CO, mV
D клас	41.09	4.17	33.80
E клас	28.21	2.29	41.38
F клас	52.22	6.51	31.14
P клас	63.17	45.50	172.08

Използвайки стандартните отклонения и средните стойности на показанията на сензора, бяха генерирани 100 произволни показания за всеки клас масло, за да се симулират данни от измерването. Генерираните данни имат стандартни отклонения два пъти по-големи от тези на реално измерените данни, както е представено в табл. 4.

Разпределението на симулираните данни в пространството, определено от сензорите за NO₂, NH₃ и CO, е изобразено на фиг. 10.



Фиг. 10. Симулирани класове за тест

Използвайки симулираните данни, изкуствената невронна мрежа произвежда класификация на входните данни в един от четирите класа на изследваното масло.

Confusion Matrix					
Output Class	Target Class				
	1	2	3	4	
1	100 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100.0% 0.0%
2	0 0.0%	95 23.8%	0 0.0%	1 0.2%	99.0% 1.0%
3	0 0.0%	0 0.0%	97 24.2%	5 1.2%	95.1% 4.9%
4	0 0.0%	5 1.2%	3 0.8%	94 23.5%	92.2% 7.8%
	100.0% 0.0%	95.0% 5.0%	97.0% 3.0%	94.0% 6.0%	96.5% 3.5%

Фиг. 11. Матрица на резултатите на симулирана класификация на данни

Въпреки че стандартното отклонение на симулираните данни е два пъти по-голямо от реалните данни, използвани за обучение на невронната мрежа, симулираните данни са точно разпознати и класифицирани, както е показано на фиг. 11.

Таблица 5. Стойности на основните показатели за оценка на ANN

Метрика	Стойност
Точност (Accuracy)	0.9825
Прецизност (Precision)	0.9650
Recall	0.9650
F1Score	0.9650

На базата на това може да се заключи, че обучената невронна мрежа може успешно да се използва за класифициране на описаните класове слънчогледово масло.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработената мултисензорна система за разпознаване и класификация на базата на сензорен модул с три независими металооксидни газови сензорни елемента се характеризира с ниска консумация на енергия. На базата на експериментални данни за слънчогледово масло, получени с нея, е обучена изкуствена невронна мрежа. Невронната мрежа класифицира различните класове слънчогледово масло с много добра точност. По нататъшните изследвания ще бъдат насочени към събирането на данни за слънчогледово масло от различни производители, за да се сравни дали данните на различните етапи на производство между производителите са сравними или дали има забележими разлики в зависимост от производителя и използваното технологично оборудване.

БЛАГОДАРНОСТ

Тази работа е подкрепена от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Наука и образование за интелигентен растеж 2014 - 2020“, Проект CoS „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“, № BG05M2OP001-1.002-0023.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] K. G. Krishna, S. Parne, N. Pothukanuri, V. Kathirvelu, S. Gandhi, D. Joshi. Nanostructured metal oxide semiconductor-based gas sensors: A comprehensive review. *Sensors & Actuators: A. Physical*, 341 (2022) 113578.
- [2] S. Dhall, B.R. Mehta, A.K. Tyagi, K. Sood. A review on environmental gas sensors: Materials and technologies. *Sensors International*, 2 (2021) 100116,



- [3] A. Loutfi, S. Coradeshi. Odor Recognition for Intelligent Systems. IEEE Intelligent Systems, 2008, No.1, 41-48.
- [4] H. G. J. Voss, S. L. Stevan, R. A. Ayub. Peach growth cycle monitoring using an electronic nose. Computers and Electronics in Agriculture 163 (2019) 104858.
- [5] A. Makarichian, R. A. Chayjan, E. Ahmadi, D. Zafari. Early detection and classification of fungal infection in garlic (*A. sativum*) using electronic nose. Computers and Electronics in Agriculture 192 (2022) 106575.
- [6] Q. Zhou, Z. Dai, F. Song, Z. Li, C. Song, C. Ling. Monitoring black tea fermentation quality by intelligent sensors: Comparison of image, e-nose and data fusion. Food Bioscience 52 (2023) 102454.
- [7] J. Cheng, J. Sun, K. Yao, M. Xu, Y. Tian, C. Dai. A decision fusion method based on hyperspectral imaging and electronic nose techniques for moisture content prediction in frozen-thawed pork. LWT - Food Science and Technology 165 (2022) 113778.
- [8] Q. Zhang, S. Kang, C. Yin, Z. Li, Y. Shi. An adaptive learning method for the fusion information of electronic nose and hyperspectral system to identify the egg quality. Sensors & Actuators: A. Physical 346 (2022) 113824.
- [9] P. F.M. Pereira, P. H. de Sousa Picciani, V. Calado, R. V. Tonon. Electrical gas sensors for meat freshness assessment and quality monitoring: A review. Trends in Food Science & Technology 118 (2021) 36-44.
- [10] Data Sheet. MiCS-6814. (https://www.sgxsensortech.com/content/uploads/2015/02/1143_Datasheet-MiCS-6814-rev-8.pdf).



**СЪВРЕМЕННИ ЛАБОРАТОРНИ СВЕТЛОТЕХНИЧЕСКИ
ИЗМЕРВАНИЯ С ГОНИОФОТОМЕТЪР И СПЕКТРОРАДИОМЕТЪР С
ИНТЕГРИРАЩА СФЕРА В ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - ГАБРОВО**

**CONTEMPORARY LABORATORY LIGHTING ENGINEERING
MEASUREMENTS USING A GONIOPHOTOMETER AND A
SPECTRORADIOMETER WITH AN INTEGRATING SPHERE AT THE
TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO**

Plamen Tsenkov Tsankov
Technical University of Gabrovo
plamen@tugab.bg

Ivaylo Petrov Stoyanov
Technical University of Gabrovo
ivo100v@gmail.com

Milko Todorov Yovchev
Technical University of Gabrovo
milkoyovchev1986@gmail.com

Hristo Todorov Ibrishimov
Technical University of Gabrovo
ico@tugab.bg

Ivaylo Vasilev Lazarov
Technical University of Gabrovo
iv.lazarov@mail.bg

Abstract

The increasing lighting quality and energy efficiency requirements are a prerequisite for manufacturers and distributors of luminaires to observe their electrical, photometric and color characteristics. The measurement capabilities of a goniophotometer and spectroradiometer, built according to the Competence Center project at the Technical University of Gabrovo are studied in this article. The LSG-1700B goniophotometric system measures important photometric indicators and characteristics of different types of luminaires, such as luminous flux, luminous intensity, light distribution curves, beam angle, field angle, luminaire efficacy and glare rating. With an LMS-9000B spectroradiometer with an integrating sphere, the measurement of electromagnetic radiation of the visible spectrum, correlated color temperature, color rendering index, electric current, active power, power factor and harmonic components of current and voltage of lamps and luminaires is performed. The obtained results prove the comprehensive capabilities of the measurements with the goniophotometer and spectroradiometer which are in accordance with established international and European lighting engineering methods and standards.

Keywords: goniophotometer, spectroradiometer, tested LED luminaires, photometric and colorimetric measuring.

ВЪВЕДЕНИЕ

Повишаващите се изисквания към електроенергийната ефективност и качеството на електрическото осветление са предпоставка фирмите производители и разпространители на лампи и осветители

да съблюдават техните електрически, фотометрични и цветови параметри и характеристики.

В Технически университет – Габрово, по проект Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“ (ЦК ИМЕЕСТ),



от 2020 г. функционира специализирана научноизследователска лаборатория С7.3 „Екологични, енергоспестяващи и електромагнитно съвместими светлотехнически, LED и ВЕИ компоненти и технологии“. Основните дейности в лабораторията са свързани с измерване на електроенергийни, фотометрични и цветови характеристики и параметри на светлинни източници и осветители за вътрешно, външно и улично приложение, както и с измерване на параметри за качество на електрическата енергия в променливотокови захранващи системи, волт-амперни характеристики и производителност на фотоволтаични (PV) модули. Тези параметри и характеристики, получени от лабораторните измервания, са необходими за нуждите на производители и търговци на осветители, електронно оборудване и собственици на PV системи и централи, както и за обучението на студенти и докторанти.

В доклада се представят резултати от съвременни лабораторни светлотехнически измервания посредством гониофотометър и спектрометри с интегрираща сфера на осветители с различно предназначение, конструкция, тип и мощност.

ИЗЛОЖЕНИЕ

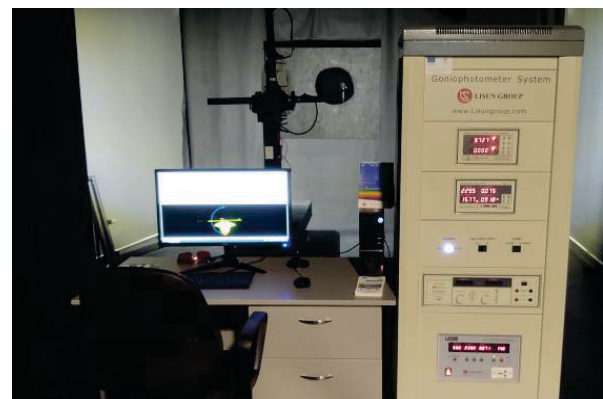
Съгласно научната програма на Центъра за компетентност в периода от 2020 г. до 2023 г. в лабораторията са заложили и се изпълняват следните дейности:

- измерване на фотометрични, цветови и електроенергийни характеристики на прототипи на светодиодни (LED) осветители за вътрешно, външно и улично приложение;
- моделиране и сравнителни фотометрични измервания на оптични компоненти за LED осветители;
- измерване на волт-амперни характеристики и ефективност на PV модули и стрингове с различен материал;

- изследване на показателите за качество на електрическата енергия на светлотехническо и ВЕИ електронно оборудване;

- дейности, свързани с акредитиране на лабораторията за изпитване на светлотехнически и електротехнически характеристики на LED осветители и измерване на количествени и качествени показатели на вътрешни и външни осветителни уредби.

Светлотехническата лаборатория е разделена на две измервателни зони. В едната зона, която няма достъп до външни източници на светлина, се разполагат гониофотометър, лазер за оптично центриране, две оптични бленди и фотодетектор. Разстоянието между гониофотометъра и фотодетектора е 8 m, с което се изпълнява изискването за разстояние, 5 пъти по-голямо от най-големия линеен размер на светлинния източник, и се осигурява необходимата точност на фотометричните измервания. Повърхнините в лабораторията са третирани с черно покритие с коефициент на отражение $\rho \leq 10\%$ [1,2,3,4]. 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 - фиг. 1.



Фиг. 1. Външен вид на гониофотометрична система LSG-1700B



Във втората измервателна зона в лабораторията се разполагат спектрорадиометър с интегрираща сфера с диаметър $d = 2$ m, измервателна апаратура, обособена в комплект, и компютърна конфигурация със специализиран софтуер, с която се управляват измервателните процеси - фиг. 2.

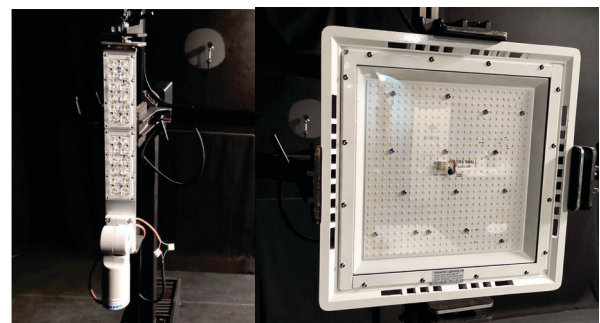


Фиг. 2. Външен вид на измервателния комплект LMS-9000B с интегриращата сфера

Първоначално се извършва калибриране на гониофотометър LSG-1700B със стандартна нажежаема халогенна лампа за интензитет на светлината SLS-150W, придружена със свидетелство за калибриране, в което са посочени: постоянно напрежение 30 V; ток 6,110 A; светлинен поток $\Phi = 4353,7$ lm; интензитет на светлината $I = 399,26$ cd; корелирана цветна температура $T_c = 3195$ K. По време на калибрирането се задават чрез специализиран софтуер LSG-1700B Goniophotometer и постоянно токов регулатор към измервателния комплект на системата точните стойности на тока и напрежението на лампата, като и калибрираната стойност на интензитета на светлината [8]. Изчисленото след калибрирането разстояние между гониофотометъра и фотодетектора съответства на действителното – 8 m. Калибрирането на гониофотометъра се извършва при настъпване на промяна в обзавеждането на лабораторията и при актуализация на специализирания софтуер.

С внедрената в лабораторията гониофотометрична система LSG-1700B се извършва измерване и автоматизирано изчисляване на светлинен поток, светлоразпределителни криви, ъгъл на светлинния сноп ($0,5 \cdot I_{\max}$) и ъгъл на светлинното поле ($0,1 \cdot I_{\max}$), пространствени изолуксни и изоканделни криви, степен на заслепяване, коефициент на използване на светлинния поток, ток, активна мощност, фактор на мощността, светоотдаване и определяне на класа на енергийната ефективност на лампи и осветители. Фотометричните измервания са в съответствие с международните и Европейските стандарти и методи, и се провеждат при определени параметри на околната среда – относителна влажност и температура на въздуха [1,2,3,4]. В периода 2020 г. ÷ 2023 г. в лабораторията са извършени фотометрични измервания на стотици варианти на оптичните системи на 64 броя LED осветители с различна конструкция, тип и мощност за вътрешно, външно и улично осветление.

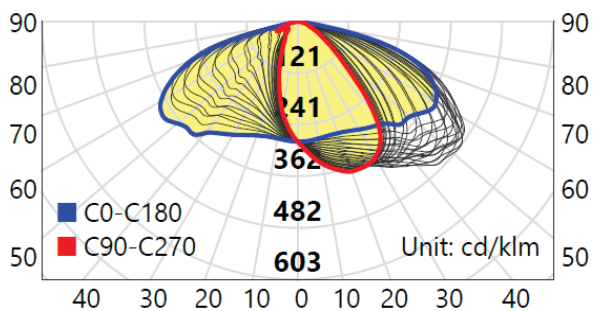
Резултатите от извършени лабораторни фотометрични измервания с гониофотометрична система LSG-1700B за уличен LED осветител с мощност 55 W са показани на фиг. 3÷6. Фотометричните измервания се провеждат при достигане на установен температурен режим на осветителите – осигурено време за подгряване от 30 минути.



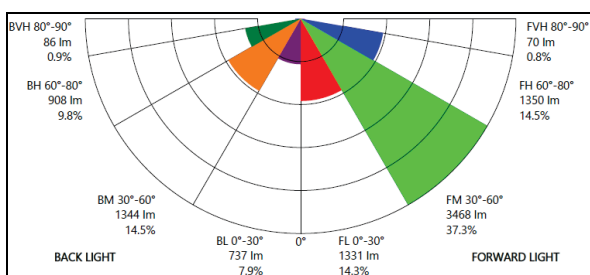
Фиг. 3. Позициониране на уличен и индустриален LED осветители към гониофотометър LSG-1700B



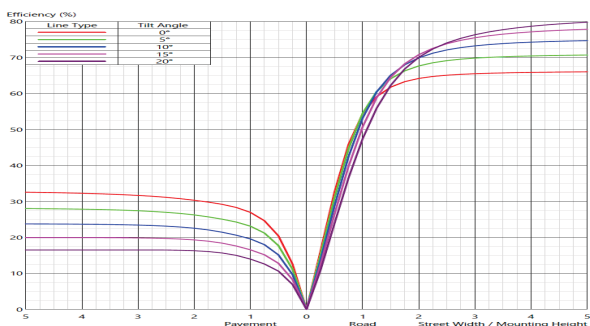
На фиг. 7÷9 са показани реализираните светлоразпределения от измервания с гониофотометъра на фотометричните характеристики на LED осветители за външно (фиг. 7), вътрешно (фиг. 8) и рекламно (фиг. 9) приложение.



Фиг. 4. Измерени светлоразпределения в различни фотометрични равнини на уличния LED осветител



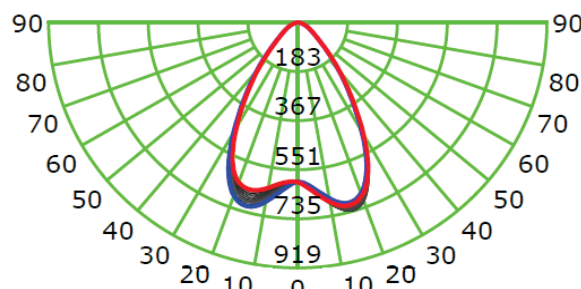
Фиг. 5. Разпределение на зоналния светлинен поток на уличния LED осветител



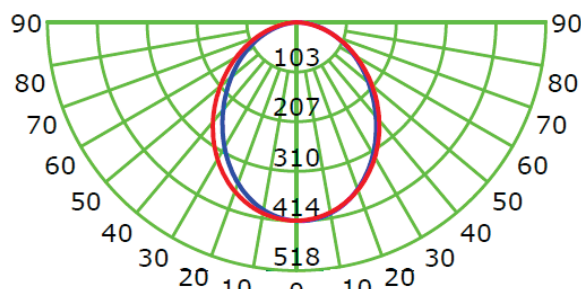
Фиг. 6. Изчислен коефициент на използване при различно съотношение на широчина на улицата и височина на окачване на осветителя при различен ъгъл на наклона

Измерванията на светлоразпределенията на LED осветителите се извършват при интервал на изменение на фотометричната C-равнина през 5° и на вертикалния фото-

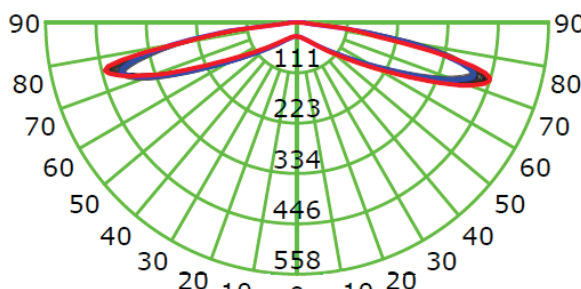
метричен ъгъл γ през 1° , с което се удовлетворяват изискванията за достатъчна точност при този вид измервания [1,3]. Получените от измерванията светлоразпределения се представят в двата основни цифрови файлови формата – *.ldt и *.ies, с които се извършват на по-късен етап изчисления с професионални светлотехнически софтуерни продукти (DIALux, Relux и др.) за проектиране на осветителни уреди.



Фиг. 7. Измерени светлоразпределения на LED осветител 420 W за външно осветление



Фиг. 8. Измерени светлоразпределения на LED осветител 33 W за вътрешно осветление



Фиг. 9. Измерени светлоразпределения на LED осветител 12 W за рекламно осветление

В табл. 1 са представени резултати от лабораторни измервания с гониофотометрична система LSG-1700B за мощност P и



основни фотометрични показатели – светлинен поток Φ , максимален интензитет на светлината I_{max} за условен светлинен поток $\Phi = 1000 \text{ lm}$, ъгъл на светлинния сноп $0,5 \cdot I_{max}$, светоотдаване η и определен клас на енергийна ефективност на изследваните LED осветители с представените по-горе светлоразпределения.

Табл. 1. Измерени мощност и основни фотометрични показатели на LED осветители с различно приложение

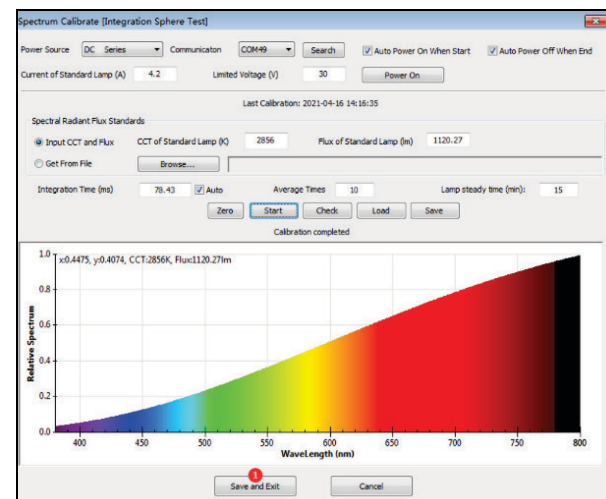
LED осветител - приложение	Измерени фотометрични параметри					
	P [W]	Φ [lm]	I_{max} [cd/klm]	$0,5 \cdot I_{max}$ [°]	η [lm/W]	Клас
Улично	55	9294	482	149,4	167,8	C
Външно	420	58044	736	68,8	138,2	D
Вътрешно	33	3298	414	92,9	99,9	F
Рекламно	12,3	1008	446	168,4	82	F

Измерването на цветовете характеристики на лампи и осветители се извършва със спектрорадиометър с 2-метрова интегрираща сфера LMS-9000B. Точността на LMS-9000B по отношение на спектралния състав и светлинния поток се гарантира от стандартна халогенна лампа за светлинен поток SLS-100W със свидетелство за калибриране с висока точност: електрически ток 4,2013 A; светлинен поток $\Phi = 1272,6 \text{ lm}$; корелирана цветна температура $T_c = 2856 \text{ K}$. Стойностите на параметрите на лампата се задават през специализирания софтуер LMS-9000B, след което се електрозахранва [8]. Калибрирането се извършва след установяване на светлинния поток за 15 минути. На фиг. 10 е показан екранен прозорец с визуализирано спектрално разпределение на еталонната лампа след калибриране.

Със спектрорадиометъра с интегриращата сфера LMS-9000B в лабораторията се извършва измерване на светлинен поток, спектрално разпределение на излъчване ϕ_λ във видимия спектър – $\lambda = (380 \div 800) \text{ nm}$, корелирана цветна температура T_c , индекс

на цвето предаване R_a и частни индекси на цвето предаване ($R1 \div R15$), координати на цветност x, y , доминантна λ_d и пикова λ_p дължина на вълната, наситеност и нюанс на цветовете, както и електрическите ток, мощност, светоотдаване, фактор на мощността и хармонични съставлящи на тока от 1-ви до 50-ти порядък.

Измерванията с LMS-9000B се извършват в съответствие с международните и Европейските стандарти и методи [4,5,6,7]. В периода 2020÷2023 г. в лабораторията са извършени успешно измервания на цветовете характеристики на LED осветители с различен тип и мощности от 0,5W до 420W за вътрешно, външно, улично и оранжевено осветление - фиг. 11.



Фиг. 10. Спектрално разпределение на еталонна лампа

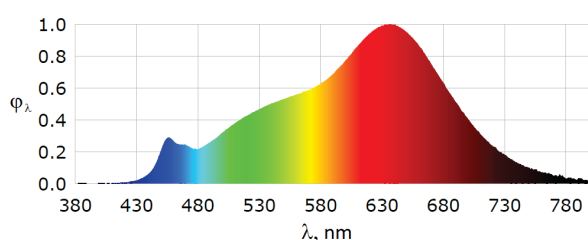


Фиг. 11. Измерване на спектрално разпределение на оранжев LED осветител

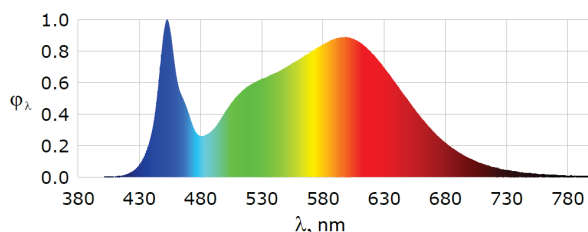


Спектралното разпределение на излъчване, измерено с LMS-9000B, за три LED осветителя с различно предназначение е показано на фиг. 12÷14. Тъй като осветителите са с различна геометрична форма, за всеки от тях се извършва определяне на коефициента на засенчване.

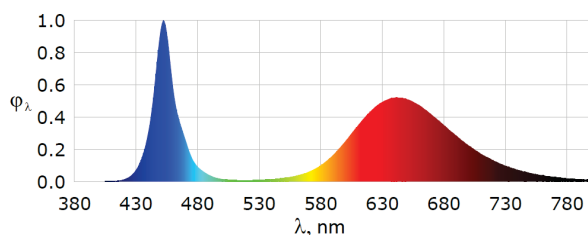
От изследванията в лабораторията, за периода 2020÷2022 г., са издадени 11 научни публикации в България и чужбина, 5 от които реферирани в Scopus.



Фиг. 12. Спектрално разпределение на LED осветител 5,5 W, тип E27, за битово осветление



Фиг. 13. Спектрално разпределение на LED осветител 33 W за вътрешно индустриално осветление



Фиг. 14. Спектрално разпределение на LED осветител 12 W оранжерийно осветление

Значителна част от резултатите са получени като дейности на лабораторията в изпълнение на стопанска дейност по общо 8 договора с 4 фирми от България и един – с възложител фирма от Барселона, Испания, както и като съвместна научноизследова-

телска дейност с партньорски университети от Проект ЦК ИМЕЕСТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получените резултати от извършените електроенергийни, фотометрични и цветови измервания на LED осветители с гониофотометъра и спектрорадиометъра, калибрирани с еталони от висок клас, доказват работоспособността и точността на внедреното оборудване, както и повишената квалификация на екипа в научно-изследователска лаборатория С7.3 „Екологични, енергоспестяващи и електромагнитно съвместими светлотехнически, LED и ВЕИ компоненти и технологии“. Научните публикации и реализираните договори за стопанска дейност с фирми от България и чужбина утвърждават лабораторията като една от водещите в региона за извършване на съвременни лабораторни светлотехнически измервания и изпитания на количествените и качествените показатели и характеристики на лампи и осветители с различно предназначение.

БЛАГОДАРНОСТ

Настоящите изследвания е подкрепена от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Наука и образование за интелигентен растеж 2014 - 2020“, Проект Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“, № BG05M2OP001-1.002-0023.

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 Goniophotometry of Luminaires.
- [3] CIE 84-1989 – The Measurement of Luminous Flux.
- [4] IES LM-79-08 – Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Product, Illuminating Engineering Society, 2007.



ЕВРОПЕЙСКИ СЪЮЗ
ЕВРОПЕЙСКИ СТРУКТУРНИ И
ИНВЕСТИЦИОННИ ФОНДОВЕ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ
„МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ
СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“
ГАБРОВО 23



ОПЕРАТИВНА ПРОГРАМА
НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ ЗА
ИНТЕЛИГЕНТЕН РАСТЕЖ

- [5] CIE 13.3-1995 – Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources.
- [6] CIE 15-2018 – Colorimetry, 4th Edition.
- [7] CIE 177:2007 – Colour Rendering of White LED Sources.
- [8] Tsankov, P. Commissioning of a Goniophotometer and an Integrating Sphere with Spectroradiometer in a New Lighting Laboratory at the Technical University of Gabrovo. UNITECH'20, Gabrovo, Bulgaria. pp. I- 141-146.
- [9] Aleksandrov, N. Fundamental Colors Theory. Sofia, East-West, 2012, pp. 93-98.



ИЗСЛЕДВАНЕ НА ХИДРОАКУСТИЧНИ СИГНАЛИ ОТ ДЕЛФИНИ

EXPLORATION OF HYDROACOUSTIC DOLPHIN SIGNALS

H. Zhivomirov

Technical University of Varna

I. Nedelchev

Technical University of Varna

H. Pirovsky

Technical University of Varna

G. Dimitrov

Technical University of Varna

Abstract

Dolphins inhabiting the Black Sea region are an interesting environment for research and an opportunity to obtain information about their communication and social activity. Marine mammals use echolocation systems to locate underwater objects such as landform features, food, and predators. Measurement of the underwater signals generated by them is one way to reveal characteristic features in their communication and obtain more information about the influence of human activity in their environment.

Keywords: hydroacoustic, measurements, signal processing, marine mammals

ВЪВЕДЕНИЕ

Морските бозайници (делфини, китове, кашалоти) генерират звуци в широк честотен спектър. Тези звуци изпълняват различни функции – адресиране към други индивиди, комуникация, локация на предмети и др. [1].

Изучаването на параметрите на сигналите за комуникация между морските обитатели, както и техния контекст, би довело до по-ясна представа за начина им на живот. На фона на проучванията в световен мащаб, комуникацията между морските бозайници в Черноморския регион са слабо изследвани. Ето защо, екипът от лаборатория „Изследване на подводни шумове, сигнали и вибрации на морски съдове и съоръжения“ изпълнява задачи за разкриване на някои малко изследвани аспекти в тази област.

ИЗЛОЖЕНИЕ

1. Експериментална постановка

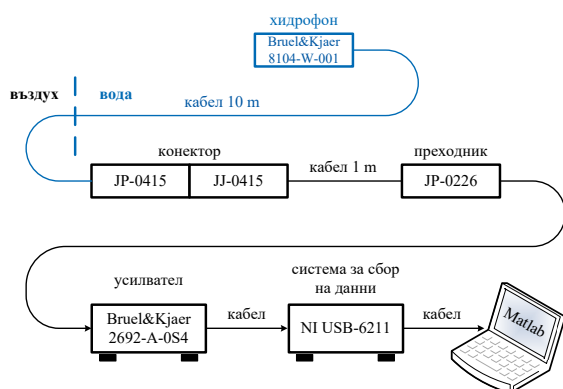
При изследването на подводни сигнали за комуникация между морски обитатели,

основен обект представляват сигналите породени от делфините, обитаващи Черноморския регион. Както е известно, три са видовете, които се срещат в Черно море: муткур (морска свиня) – *Phocoena phocoena*, обикновен делфин – *Delphinus delphis* и афала (бутилконос делфин) – *Tursiops truncatus* [2]. Изследванията имат за цел запис и обработка на сигнали от тези видове делфини, както и класификацията на генерираните от тях сигнали, създаване на база от данни с цел осигуряване на възможност за тяхната понататъшна обработка.

В хода на планираните дейности за осъществяване на тези цели, се появи и възможност за сравняването им със сигнали, генерирани от делфини родени в Карибския регион, които са на разположение във „Феста Делфианриум Варна“. Така се оформиха два аспекта на изследването: запис на сигнали от питомни делфини в котролирана среда (във „Феста Делфинариум Варна“) и запис на сигнали от диви делфини в природна среда (в акваторията на Варненски залив).



При първия етап на изследването, сигналите генерирани от питомни делфини са записвани чрез хидроакустичен канал (ХАК), състоящ се от: хидрофон В&К 8104 [3], хидроакустичен усилвател В&К Nexus 2692 [4], модул за събиране на данни NI USB 6211 [5], компютър и авторски софтуер (разработен в средата на Matlab) [6], кабелни връзки и мобилно захранване на усилвателя (фиг. 1).



Фиг. 1. Хидроакустичен канал за измерване в басейн – схема (горе) и реализация (долу).

Вторият етап касае измерването на сигнали в открити води. При него се използва хидроакустичен логер (ХАЛ) SoundTrap 600 HF [7], чиято енергийна автономност се обуславя от вградена енергийна банка в корпуса му, а информационната му автономност е осигурена чрез карти за данни до 1 ТВ. ХАЛ притежава възможност за запис без необходимост от техническо об-

служване до 4 месеца. Уредът е вграден в специално изработен за целта морски измервателен буй, закотвен в момента в акваторията на Варненски залив, на позиция с географски координати: 43°12'02"N, 27°57'57"E на 1,5 км от бреговата линия.



Фиг. 2. ХАЛ (горе) и носещия измервателен морски буй (долу) преди позиционирането му.

Измерванията в басейна на делфинариума бяха извършени в продължение на три месеца, при различни типове дейност на делфините – свободна игра, тренировка, нощна активност.

Измерванията в открити води бяха осъществени на два етапа: първият беше изпитвателен за буйа и системата с продължителност две седмици, а вторият етап – активни записи на сигнали в близката околност на буйа. По време на тези два етапа бяха събрани ценни данни за състоянието на подводната шумова среда в залива.

Предвид характера на генерираните от делфините сигнали, чиято честотна лента достига до 120 kHz [8], цифровите преобразуватели на измервателните канали – модул за събиране на данни и ХАЛ бяха настроени на честота на дискретизация съответно 250 kHz и 384 kHz.



2. Изследователски техники

Получените сигнали в суров вид не са пригодни за анализ, сравнение и класификация, затова са необходими някои предварителни обработки (signal conditioning):

(i) филтрация на сигнала с оглед отстраняване на шумовете, породени от помпи (в басейн) или двигатели на плавателни средства (в открити води). Използван е нискочестотен филтър с честотата на среза 500 Hz. По този начин, всички нискочестотни смущения се отстраняват, а полезният сигнал не се засяга, тъй като не попада в тази лента;

(ii) отделяне (сегментиране) на полезните сигнали, генерирани от делфини от шумовия фон на средата;

(iii) амплитудно нормиране на получените сигнални последователности.

Така обработени, полезните сигнали могат да бъдат сравнявани и разпределени по групи според характерни техни белези. Един от основните начини за класификация на сигналите генерирани от делфини е тяхната структура. Нейното разкриване става чрез няколко техники:

(i) визуално изследване структурата на сигнала във времевата област, чрез наблюдение на осцилограмата.

(ii) установяване на разпределението на енергията на сигнала в честотната област с използване на време-честотен анализ и спектрограма [9];

(iii) откриване на основния тон и негови хармонични (pitch detection) с използване на т.нар. кепстрален анализ и кепстрограма [10];

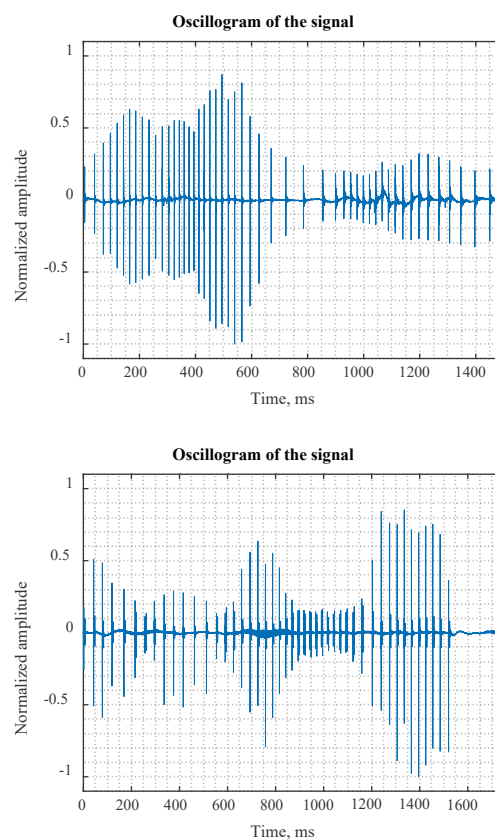
(iv) автокорелационен анализ, с цел допълнителна верификация на резултатите [10].

Използваните техники за обработка на измерените сигнали са реализирани в средата на Matlab чрез софтуер, създаден от членовете на екипа на лабораторията.

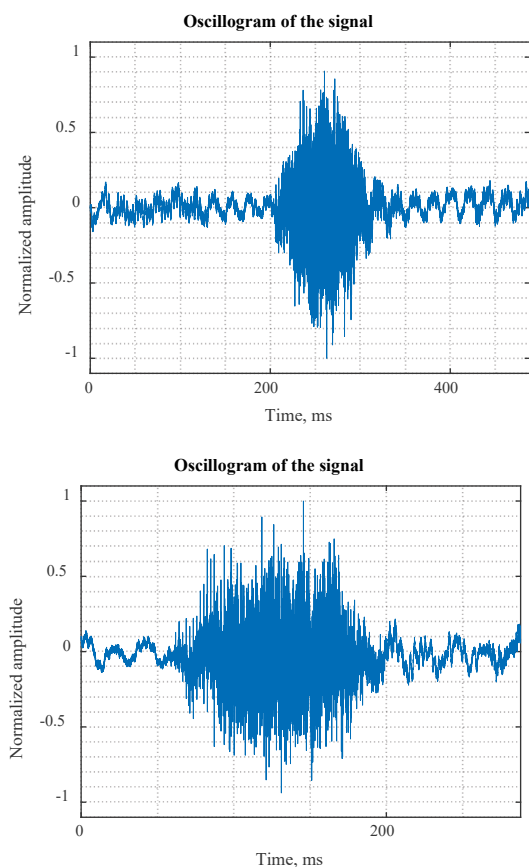
3. Основни резултати

В резултат на направените измервания бяха получени данни, които след обработка, бяха класифицирани и разпределени според техните структурни особености. Получените полезни сигнали, наричаме секвенции (последователности). Стана ясно, че независимо от средата или източника на сигнала (делфини в басейн или диви морски бозайници), се открояват два типа сигнали.

Първите са съставени от последователности от кратки импулси, чиито амплитуди и интра-импулсно разстояние се променят през времетраенето на сигнала. Структурно тези последователности наподобяват комбинация от амплитудна и честотна модулация (фиг. 3). Такива типове сигнали са известни като кликове (clicks).



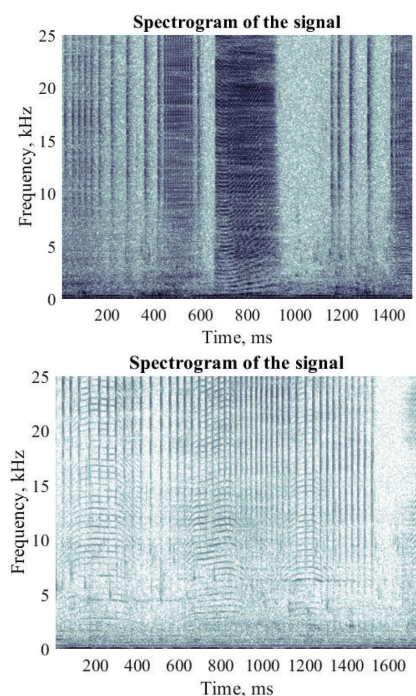
Фиг. 3. Клик сигнали (Click signals).



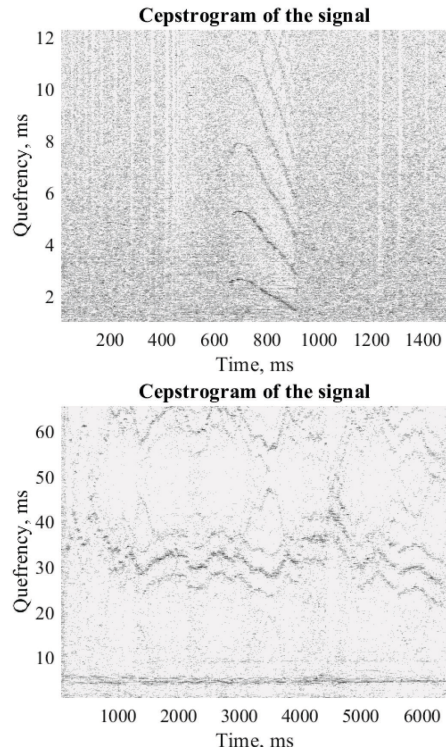
Фиг. 4. Бърст сигнали (Burst signals).

Другата голяма група сигнали наподобяват шум с променлива във времето амплитуда на обвиващата крива (фиг. 4). Това са т.нар. бърст сигнали (bursts). Те имат кратка продължителност и се разпростират в широк честотен спектър.

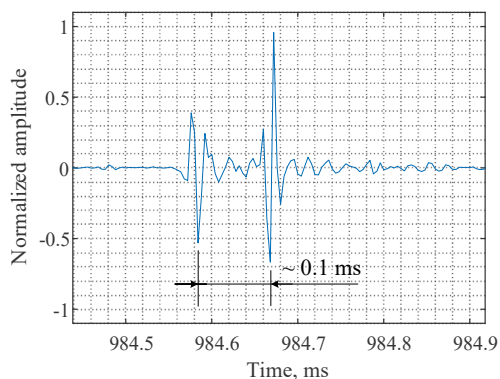
След проведен анализ са получени и спектрите на измерените сигнали. За прегледност на резултатите и по-добра информативност, е използвано представянето им както във времевата така и в честотната област – чрез спектрограма (фиг. 5). На фиг. 6 са дадени кепстрограми на два сигнала, представители на двете групи – кликове и бърстове. В площта на графиката са открити областите, които дават информация за периодичности в изследваните сигнали, както и техните стойности в ms.



Фиг. 5. Спектрограми на анализирани сигнали от делфини. Горне – на бърст сигнал, долу – на клик сигнал.



Фиг. 6. Кепстрограми на анализирани сигнали от делфини. Горне – на бърст сигнал, долу – на клик сигнал.



Фиг. 7. Двоен импулс, от който са изградени клик сигналите.

4. Анализ на резултатите

Така онагледени след обработката, резултатите съдържат информация за параметрите, чрез които може да се осъществи комуникация между индивидите.

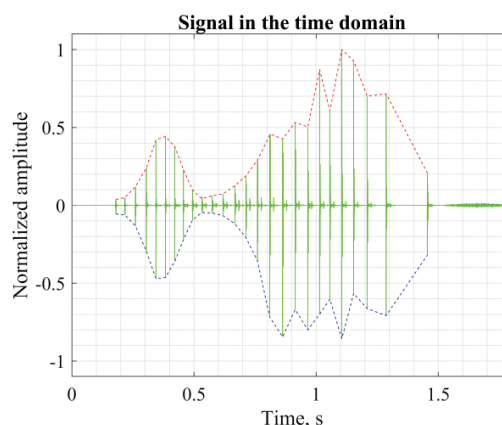
Бърст сигналите имат шумоподобен характер с честотна лента до около 20 ÷ 30 kHz. При повечето от тях се разкрива скрита периодичност (фиг. 6), което се обуславя от импулсите, образуващи сигналите и от сонарния апарат на делфините, чрез който са генерирани. Те се срещат много по-рядко в общата поредица от сигнали за общуване и вероятно имат опознавателен характер, като например може да съдържат информация за име, начало или край на разговор или изречение.

Другият вид са клик сигналите, които наподобяват сонарни сигнали. Те са съставени от поредица кратки и стръмни двойки импулси, с разстояние помежду им от около 0,1 ms (фиг. 7).

При кликовете има ясно изразена амплитудна модулация, а в много случаи тя е съпътсвана и от честотна модулация, т.е. импулсите изменят както амплитудата, така и позицията си във времето, в хода на една последователност. Този вид сигнали са най-често генерираните и при тях се наблюдават две основни периодичности – една сравнително постоянна и ниска като стойност (няколко ms), породена от спе-

цификата на сонарния апарат на делфина и отговарящ на разстоянието между двойните импулси; и втора – квази периодична (със стойности няколко десетки ms), породена от модулацията на импулсите в честотната област. Чрез този тип сигнали делфините могат да разпознават обекти с различна големина под водата, като големината на обследвания обект и резолюцията на получения образ за него се определя от честотата на използвания от делфина сонарен сигнал. Високата честота на импулсите вътре в генерираните импулсни последователности, обуславя висока резолюция на сканирания обект и по-висока точност на получената картина в мозъка на делфина. Това обяснява и промяната на честотата на импулсите в хода на една последователност – по този начин делфинът „уточнява“ размера на обекта, субекта или част от релефа под водата.

Както беше отбелязано, другата характерна особеност на този тип сигнали е тяхната амплитудна модулация, която формира т.нар. обвиваща крива (фиг. 8).



Фиг. 8. Обвиваща крива на клик сигнали.

В комуникационната техника, модулацията се използва за пренасяне на информация на разстояние. Този тип модулация на изследваните сигнали в голяма степен наподобява амплитудната модулация в



телекомуникациите и вероятно съдържа информация, чрез която може да се осъществява реално предаване на смислени фрази между различни индивиди в групата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От направения обзор на изследваните сигнали от няколко вида делфини в басейн и в открити води, могат да бъдат направени някои основни изводи:

1. Получените сигнали могат да бъдат разделени на два основни типа: кликове – за комуникация и детекция и бърстове – за разпознаване и позоваване.

2. Сигналите от трите вида делфини в акваторията на Варненския залив имат еднаква структура и особености, както и сигналите записани в басейн в контролирана среда, издавани от афали родени в Карибския регион. Това води до заключението, че независимо от вида на делфина, параметрите на комуникацията са еднакви и тя се извършва по един и същ начин.

3. Амплитудната модулация при кликовете съдържа комуникационна информация.

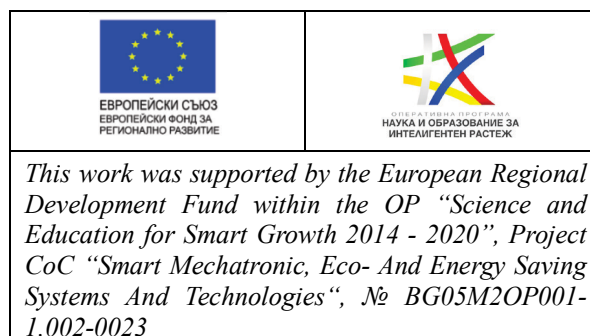
4. Честотната модулация при кликовете е пряко свързана с размерите и резолюцията на образа на детектирания обект.

В резултат на направените записи и анализи е създадена база от данни [11, 12], която се използва от лингвисти в университета в гр. Нова Горица (Словения) за разкриване на елементарните нива на комуникация между делфините от рода афала.

Чрез детайлното обследване на хидроакустични сигнали във водна среда има възможност за установяване влиянието на антропогенните фактори на средата върху морските обитатели, чрез сигнали генерирани от морски съдове, както и в акваторията на пристанищни райони.

Екипът на лабораторията планира бъдещи изследвания в тази област, като из-

върши заснемане на шумови профили на морски съдове и като работи по създаване на шумови карти на пристанищни райони. Припокриването на честотните спектри и нивата на антропогенните хидроакустични сигнали в голяма степен биха разкрили степента на такова влияние.



ЛИТЕРАТУРА

- [1] D. Herzing. Clicks, whistles and pulses: Passive and active signal use in dolphin communication. *Acta Astronautica*, vol. 105, no. 2, 2014, pp. 534-537. DOI: 10.1016/j.actaastro.2014.07.003.
- [2] S. Kleinenberg. *Mammals of the Black and Azov Seas*. Moscow, Academy of Sciences of USSR, 1956. (in Russian).
- [3] Brüel & Kjaer. *Hydrophones Types 8103, 8104, 8105, 8106*. Naerum, Brüel & Kjaer, 2019.
- [4] Brüel & Kjaer. *The NEXUS Range of Conditioning Amplifiers Types 2690, 2691, 2692 and 2693*. Naerum, Brüel & Kjaer, 2015.
- [5] National Instruments. *Specifications of NI USB-6211*. Austin, National Instruments Corp., 2017.
- [6] H. Zhivomirov. *Data Acquisition and Logging with Matlab* (open-source software for data acquisition and logging with NI USB-600x, USB-621x and USB-65xx DAQ hardware). Natick, Matlab Central File Exchange. Retrieved from: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/68476-data-acquisition-and-logging-with-matlab-implementation>.
- [7] Ocean Instruments. *Underwater sound recorder STD & HF specification*. Warkworth, Ocean Instruments. Retrieved from: <https://www.oceaninstruments.co.nz/wp->



- content/uploads/2020/08/SoundTrap-600-Spec.pdf.
- [8] Alliance of Marine Mammal Parks & Aquariums. Dolphin Fact Sheet. Westminster, AMMPA, 2022. Retrieved from: <https://www.ammpa.org/sites/default/files/files/animalfactsheets/AMMPA-DolphinFactSheet-FINAL-Web.pdf>.
- [9] H. Zhivomirov. On the Development of STFT-analysis and ISTFT-synthesis Routines and their Practical Implementation. TEM Journal, vol. 8, no. 1, pp. 56-64, Feb. 2019. DOI: 10.18421/TEM81-07.
- [10] J. Benesty, M. Sondhi, Y. Huang. Springer Handbook of Speech Processing. Berlin, Springer, 2008. DOI: 10.1007/978-3-540-49127-9.
- [11] H. Zhivomirov, I. Nedelchev, G. Dimitrov. Dolphins Underwater Sounds Database. New York, IEEE Dataport. DOI: 10.21227/n00y-kq67.
- [12] H. Zhivomirov, I. Nedelchev. Dolphins Underwater Sounds Database: Preliminary Analysis Results. TEM Journal, vol. 9, no. 4, pp. 1426-1434, Nov. 2020. DOI: 10.18421/TEM94-14.



ВНЕДРЯВАНЕ НА РОБОТИЗИРАНИ И АСИСТИВНИ ТЕХНОЛОГИИ ЗА ПЕРСОНАЛИЗИРАНА ФИЗИЧЕСКА РЕХАБИЛИТАЦИЯ

IMPLEMENTATION OF ROBOTIC AND ASSISTIVE TECHNOLOGIES IN THE PATIENT-CENTERED PHYSICAL REHABILITATION

Tanio Tanev

*Institute of Robotics
Bulgarian Academy of Sciences*

Pancho Dachkinov

*Institute of Robotics
Bulgarian Academy of Sciences*

Tony P. Valayil

*Institute of Robotics
Bulgarian Academy of Sciences*

Maya Dimitrova

*Institute of Robotics
Bulgarian Academy of Sciences*

Snezhana Kostova

*Institute of Robotics
Bulgarian Academy of Sciences*

Anna Lekova

*Institute of Robotics
Bulgarian Academy of Sciences*

Abstract

There is a necessity for a consistent framework for the integration of the robotic and assistive technologies for the purposes of the rehabilitation which covers the entire spectrum (preventative, restorative, supportive, palliative rehabilitation) and explores all aspects of the recovery process – physical, emotional, and mental while allowing for real-time adjustments and flexibility based on the individual patients' needs. In this paper we propose a set of tools for a rehabilitation solution that provides personalized care for the patients from the diagnose to the process of active recovery while measuring and evaluating the individual's condition after surgery, injury or a trauma to restore and maximize the previous function. The main objective for implementing the assistive technologies into the physical therapy is to personalize the process of recovery based on the specific requirements of the patients. To achieve this, physical, emotional, and virtual devices are utilized mitigate and improve the physical and emotional challenges for the patients. In parallel with the implementation of the robotic technologies, custom-made 3D printed devices are also introduced and explored. To evaluate the effectiveness of the program, a 3-step methodology is applied – 1) diagnose of the patient, 2) implementation of the assistive technologies, 3) tracking the progress and making the necessary adjustments to the process and/or the devices.

Keywords: Assistive and robotic technologies, patient-driven rehabilitation, 3D printed custom-made devices, physical rehabilitation, rehabilitation robotics.

INTRODUCTION

The main focus of this study is to develop a new rehabilitation framework integrating the physical, virtual, and emotional robotic and assistive technologies for the needs of the physical rehabilitation which will lead to

outcomes set and driven by the patient's condition and progress.

According to a recent report, 2.41 billion or 1 in 3 individuals worldwide live with the conditions that impact their functions in daily life and would benefit from rehabilitation



therapy [1], [2]. Within the next 30 years the population over 60 years will double, the majority of whom will live with chronic diseases. This demographic distribution change will lead to a great amount of unmet rehabilitation needs [2].

Rehabilitation focuses on reaching functional independence in daily activities, work, recreation and education, while taking a meaningful role throughout those activities. Rehabilitation is a set of interventions designed to optimise functioning in individuals with health conditions (diseases – acute or chronic, injuries or trauma, aging, stress or genetic predisposition) in interaction with their environment. It consists of 4 parts [3]: preventative, restorative, supportive and palliative rehabilitation. *Preventative*: takes place shortly after a new diagnosis or onset of new impairments. The aim is to provide education, advice and interventions to prevent or slow down the onset of further impairments and maintain a person's level of ability. *Restorative*: focuses on interventions that improve impairments such as muscle strength or respiratory function and, in cognitive impairment, to get maximal recovery of function. *Supportive*: Supportive rehabilitation increases a person's self-care ability and mobility using methods such as providing self-help devices and teaching people compensatory strategies or alternative ways of doing things. *Palliative*: enables people with life limiting conditions to lead a high quality of life physically, psychologically and socially, while respecting their wishes. It often focusses on relieving symptoms such as pain, dyspnoea and oedema, preventing contractures, breathing assistance, psychological wellbeing, relaxation, or the use of assistive device in order to maximise the functional independence and support comfort, dignity and quality of life. This work aims at including all 4 parts of the rehabilitation within the same framework.

Amongst the reasons for using robots in the rehabilitation process is to provide therapy which is superior to conventional therapy [4], [5], [6], [7]. In addition to the incorporated robotic technologies, custom designed and fabricated devices, tuned to the patients' specific requirements, are also explored, evaluated and implemented to address the aspects of customization and especially in the low-budget solutions where currently there is a lack of wearable options due to the cost limitations.

To enhance the emotional state of the patients, a set of scenarios and games will be developed and integrated in parallel with the physical solutions to assess and help measure the emotional and neurological progress of the therapy and make the process more engaging via adopting virtual and mixed reality headsets. These devices allow for real-time feedback and therefore, evaluation of the performance by a visual or haptic input, which makes them suitable for motion restoration activities [8].

Another component of the framework is the Socially assistive robots (SARs) which help patients to process negative emotions and develop healthy and engaging strategies, reducing stress and improving the overall emotional well-being by adjusting to the physical and social changes related to their condition and recovery [9]. SARs can also help patients to improve their social skills, increase their confidence and overall experience during rehabilitation. Combining physical and emotional rehabilitation will lead to faster recovery of the injured patient. The humanoid socially assistive robots of type Pepper and Nao will participate as mediators in the rehabilitation sessions 24/7 in the Intensive Care Units (ICU) or other Burn and Injury Departments (BID) as in [10], [11]. The robots will be programmed to start the rehabilitation process as soon as possible after the intervention by either emotionally engaging the patients or showing the



movements required for the rehabilitation process (via the embedded “Motion animation mode” to mimic human movements) for the purposes of the emotional rehabilitation or partial assistance of the physical rehabilitation, respectively. These robot animations will be used in the ICU or other departments and show the movements in the rehabilitation protocol, in case of the Range of Motion (ROM) of the robot is suitable for that purpose.

DISCUSSION AND RESULTS

The current state of the art accounts for either only the *physical*, or the *emotional*, aspect of the rehabilitation process. Furthermore, the application of robotic devices is not widespread, these are not accessible without the guidance of experts, and do not fully cover the condition of the patients. The proposed integrated framework for physical, virtual, and emotional robotic devices in sensorimotor rehabilitation therapy is illustrated at Figure 1. This integration leads to interconnection between physical and emotional states, where improving one component helps the other and vice versa.

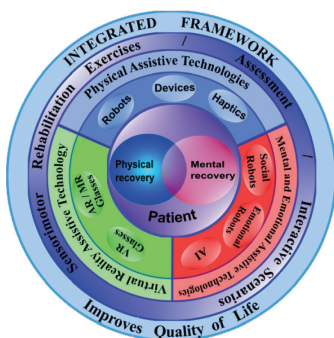


Fig. 1. Integrated Framework for Person-centered Rehabilitation

Such implementation will lead to the following benefits:

- fast response to the patients’ needs;
- flexibility for providing individual and customized treatment based on the diagnosis;

- adjustment of the level of difficulty of the exercises according to the patient’s condition;
- the robot can execute repetitive tasks tirelessly.

These assistive technologies are applicable in have different stages of the rehabilitation process as shown in Table 1.

Table 1. Implementation of the Technical Solutions for the Various Stages of the Rehabilitation

Technology	Investigate	Evaluate	Improve
Collaborative Robot	×	✓	✓
3D Printing & 3D Scanning	×	×	✓
Haptic Devices	×	✓	✓
AR/VR	×	✓	✓
Motion Capture System	✓	×	×
BCI	✓	×	×
Smart Wearables	✓	✓	✓
Socially-assistive Robots	×	✓	✓

Figure 2 shows example applications of the assistive technologies in the physical rehabilitation.

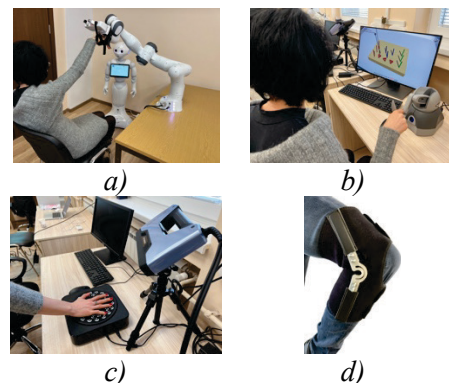


Fig. 2. Example Applications of the Assistive Technologies in the Physical Rehabilitation

In Figure 2 a), an application of a collaborative robot for the needs of the upper limb range of motion and strength recovery is illustrated; b) shows the restoration of the fine motor skills of wrist with the help of a haptic device that provides resistance during motion; c) presents an implementation of a 3D scanner for precisely measuring the shape and form of the patient's hand to create ergonomic, light weighted and personalized assistive devices; d) is a 3D Printed knee supportive device with customized parameters. Some of the factors that must be considered in the designing phase of such devices is their range of motion and stiffness based on the state of the patient's recovery. This influence is addressed on Figure 3 where a set of interchangeable assistive devices for ACL (Anterior Cruciate Ligament) rehabilitation with different stiffness to range ratios are provided.

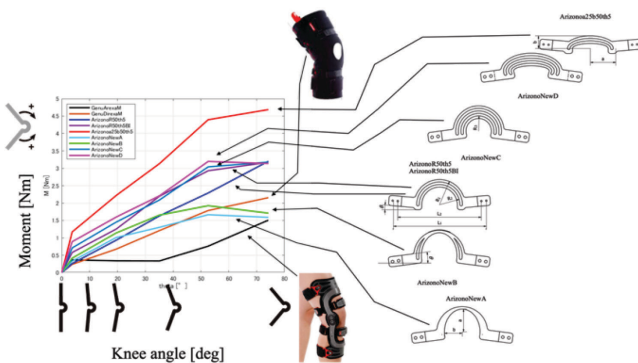


Fig. 3. Grading the 3D Printed Supports Based on their Peak Moments

As it can be clearly observed, the distribution of the moments and compatibility of the supports. By varying the parameters such as the radius of the curvature and the number of flexures, more individual solutions could be generated.

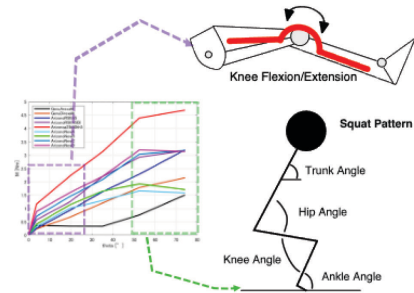


Fig. 4. Implementation of the Assistive Devices into the Rehabilitation Process

In addition, the exercise recommendation is prescribed based on the recovery status as illustrated on Figure 4. For initial peak moments shown on Figure 4 the supports are used for improving the resisted knee flexion through concentric contractions and resisted knee extension eccentrically. After the ROM and the quadriceps strength improve, the patient can transition to a device with a greater stiffness in order to further increase the muscular strength during knee flexion and extension. When the patient can perform full ROM controlled knee flexion with the stiffest support, they can transition to another exercise such as the squat pattern. For the squat, the patient starts with the stiffest support that will provide the highest level of stability and gradually transitions towards the more flexible options until they no longer need any additional assistance and are capable of performing the motion on their own.

The methodology of this study integrates different stages of the rehabilitation process and aims to provide a complete recovery of the patients, including physical, emotional, and mental support. To achieve this goal, the implementation of the assistive robotic technologies depends on the stage of recovery. To make the process as objective as possible, the methodology, adopted in this study, is divided into 3 levels. First, is to



investigate the condition and the diagnosis of the patient. At this stage, based on the condition, initial parameters will be established, measured, and tracked. Next, the process of evaluation will define the complexity of the condition and the required technologies to be implemented in order to accelerate the healing of the patient. Finally, the last step is the implementation of the technologies into the rehabilitation protocols, tracking of the improvement and adjustment of the process, based on the specific personal necessities and requirements.

Rehabilitation, as a highly person-centered process, needs to be tailored toward individual specifics of each patient which requires real-time adjustments. Implementing the robotic technologies will give that flexibility to the therapists and extend their field of operation. To target all stages of the rehabilitation, various types of assistive technologies and devices will be implemented – robots, custom-made assistive systems, virtual and mixed reality headsets, integrated with interactive scenarios, tools for monitoring the telerehabilitation, enhancement of the emotional and mental recovery as well as artificial intelligence algorithms to allow personalized data analysis and real-time adjustments of the solutions by improving the trained models. This methodology will carry the following benefits:

- unified rehabilitation protocol;
- implementation of the optimal technology;
- quick reaction to the patient's condition;
- flexible customized solutions, depending on the individual requirements;
- real-time adjustments to the process regarding the current condition of the patients.

To incorporate the above methodology into modern rehabilitation, there are several

challenges that need to be addressed and overcome. Defining the parameters to track and measure with the robotic equipment is such a complex matter. To resolve this, the experts in charge with the technical solutions will be working closely with the medical professionals throughout all steps to determine the most relevant data-driven processes. Another one is the integration of the interactive scenarios to work coherently with the virtual reality glasses. To accomplish such an integration, the software developers will need to follow the medical requirements provided by the physicians as an input for their platforms.

CONCLUSION

This research introduces a novel framework for implementation of robotic and assistive technologies in the process of physical rehabilitation while acknowledging the influence of the emotional and mental state of the patients on their physical condition and vice versa. In other words, all aspects and stages of the rehabilitation, their connections and relations are explored. Furthermore, the real-time progress tracking and adjustment requirements are discussed to improve the process and provide customized solution for the patients. The framework includes the implementation of physical devices such as robots, virtual reality headsets for emotional release as well as custom-made patient specific supports after injuries, stroke recovery and trauma. The integration of 3D printing and 3D scanning is explained and illustrated. Lastly, a methodology for evaluation of the patients' condition, technology selection, progress tracking is introduced and integrated.

This study recognizes the limitations caused by the budget restrictions and expertise requirements for the full implementation of the novel framework in the rehabilitation protocols. However, the availability and



accessibility of the robotics in parallel with the modern days rapid technological advancements will inevitably lead to mitigating the impact of these challenges and soon lifting all barriers holding the progress and innovations in the field of rehabilitation.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the European Regional Development Fund within the OP “Science and Education for Smart Growth 2014 - 2020”, Project CoC “Smart Mechatronic, Eco- And Energy Saving Systems And Technologies“, № BG05M2OP001-1.002-0023 and by the National Science Fund project under the “Petar Beron” National Science Program, No. КП – 06-ДБ /4 13.12.2021.

REFERENCES

- [1] Duttine A, Battello J, Beaujolais A, Hailemariam M, Mac-Seing M, Mukangwije P, et al. Introduction to Rehabilitation Factsheet. Handicap International. 2016.: https://humanity-inclusion.org.uk/sn_uploads/document/2017-02-factsheet-rehabilitation-introduction-web_1.pdf [Accessed on 16 January, 2023].
- [2] Shimizu Y. Rehabilitation. World Health Organization. 2020: https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/rehabilitation_ [Accessed on 16 January, 2023].
- [3] Introduction to Rehabilitation: [https://www.physio-](https://www.physio-pedia.com/Introduction_to_Rehabilitation#cite_note-1-2)
- [4] <https://www.lifescience-robotics.com/> [Accessed on 4 March 2023]
- [5] <https://www.youtube.com/watch?v=qotp80vftEM&t=221s> [Accessed on 4 March 2023]
- [6] Poli P, Morone G, Rosati G, et al. Robotic technologies and rehabilitation: new tools for stroke patients' therapy. *Biomed Res Int.* 2013;153872. DOI:10.1155/2013/153872
- [7] Mohebbi, A. Human-Robot Interaction in Rehabilitation and Assistance: a Review. *Curr Robot Rep* 1, 131–144 (2020). <https://doi.org/10.1007/s43154-020-00015-4>
- [8] Quaine, F., Dogadov, A., Servière, C., & Lopez, N. (2022). Surface Electromyographic Signals as a Tool for Biomechanics and Muscle Coordination Analysis (Doctoral dissertation, GIPSA Lab), <https://hal.science/hal-03980009/document> [Accessed on 28 February 2023].
- [9] Tanev, T. K., & Lekova, A. (2022). Implementation of Actors' Emotional Talent into Social Robots through Capture of Human Head's Motion and Basic Expression. *International Journal of Social Robotics*, 14(7), 1749-1766, <https://doi.org/10.1007/s12369-022-00910-0>
- [10] Ozturkcan, S., & Merdin-Uygur, E. (2022). Humanoid service robots: The future of healthcare? *Journal of Information Technology Teaching Cases*, 12(2), 163–169. <https://doi.org/10.1177/20438869211003905>
- [11] Dimitrova, M. (2022). Essential 'Human' Features of the Cyber-Physical Nurse. *Biomed J Sci & Tech Res* 46(1) DOI: 10.26717/BJSTR.2022.46.007285.



ИЗПОЛЗВАНЕ НА ИЗКУСТВЕН ИНТЕЛЕКТ ЗА ГЕНЕРИРАНЕ НА ДИЗАЙН НА ОБЕКТИ

Лъчезар Руменов Христов, Стефан Иванов Иванов
lachezar.hristov00@gmail.com

USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO GENERATE THE DESIGN OF OBJECTS

Lachezar Rumenov Hristov, Stefan Ivanov Ivanov
lachezar.hristov00@gmail.com

Резюме: Настоящия доклад представя приложението на различни генеративни модели изкуствен интелект, които могат да се използват за създаване на дизайн на различни обекти от архитектурата, индустрията и изкуството. Използваните модели създават графични изображения въз основа на направено детайлно описание на характеристиките, които трябва да се съдържат в изображенията. С прилагането на изкуствен интелект се ускорява процеса на дизайн, като става възможно бързо да бъдат генерирани различни визуални решения на поставения проблем, които да са в помощ на дизайнери, архитекти и инженери.

Abstract: Current paper presents the application of various generative artificial intelligence models that can be used to create designs for various objects from architecture, industry, and art. The models used here create graphical images based on a detailed description of the features that should be contained in the images. With the application of artificial intelligence, the design process is accelerated, making it possible to quickly generate different visual solutions to the given problem, to help designers, architects and engineers in their work.

ВЪВЕДЕНИЕ

Пресечната точка на изкуствения интелект (AI- Artificial intelligence) и творческите дисциплини, като инженерството, архитектурата и изкуствата, разкри възможности за генериране на иновативни и визуално завладяващи дизайни. AI системите, способни да генерират изображения, привличат значително внимание и се превръщат в ценни инструменти за професионалистите в тези области. Настоящия доклад има за цел да представи примери за генериране на изображения, специално пригодени за нуждите на дизайна в инженерството, архитектурата и изкуствата.

Дизайнът играе основна роля в оформянето на нашата физическа среда и артистични изрази. Традиционно дизайнерите в

областта на инженерството, архитектурата и изкуствата са разчитали на своя опит, интуиция и ръчни процеси, за да създадат завладяващи дизайни. Въпреки това, скорошният напредък в изкуствения интелект въведе нови подходи, които могат да помогнат и вдъхновят дизайнерите в техните творчески търсения.

Използвайки силата на изкуствения интелект, дизайнерите вече могат да генерират вариации на дизайна, да изследват алтернативни възможности и дори да открият изцяло нови концепции за дизайн. Генерирането на изображения може да помогне при автоматизирането на повтарящи се задачи и се ускори процеса на създаване на крайния дизайн чрез повишаване на креативността и производителността.



В областта на инженерството генерирането на изображения, задвижвано от AI, има потенциала да революционизира дизайна на структури, машини и системи. От генериране на архитектурни оформлени до оптимизиране на сложни инженерни компоненти, тези системи могат да помогнат на инженерите в създаването на ефективни и иновативни проекти, които отговарят на специфични изисквания и ограничения.

В архитектурата AI системите за генериране на изображения могат да помогнат на архитектите при визуализирането на архитектурни концепции, генерирането на реалистични изображения и изследването на различни пространствени подредби. Използвайки AI, архитектите могат да вдъхнат живот на своите идеи, да комуникират ефективно предложенията за дизайн и да постигнат ефективно проектиране.

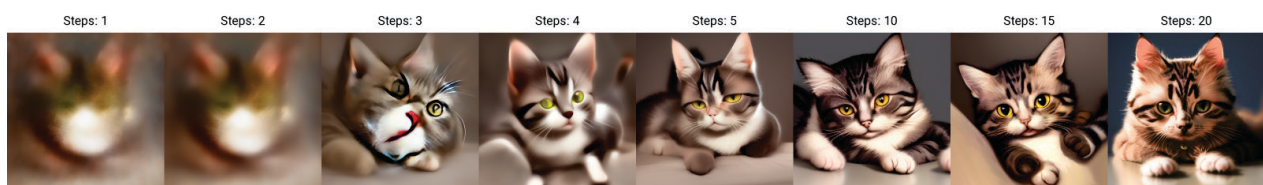
Освен това, в сферата на изкуствата, AI системите предлагат нови инструменти за художници, за да експериментират, да генерират уникални визуализации и да разширяват границите на творчеството. Като позволяват генерирането на изображения въз основа на текстови описания или съществуващи произведения на изкуството, тези системи дават възможност на художниците и дизайнерите да изследват нови артистични стилове, да преосмислят традиционните техники и да създават завладяващи цифрови форми на изкуство.

В момента са налични множество среди за генериране на изображения [1-4], които могат да се използват за нуждите на архитектурата, инженерния и художествения дизайн. Една такава система е средата Stable Diffusion [5].

Среда за генериране на изображения Stable Diffusion Web UI

Stable Diffusion е AI модел, който генерира изображения в различни стилове и размери. Изображенията могат да бъдат фотореалистични, в артистичен стил, пейзажи, портрети и много други. Начина, по който тези системи могат да бъдат използвани е следният: потребителят предава директни текстови описания на модела, който от своя страна след известен период от генерира изображение, следвайки зададените тежести на управляващите генерацията параметри.

За генерирането на изображения се използват модели на невронни мрежи, които могат да се свалят свободно от Интернет или да се създадат и тренират самостоятелно от потребителя. При използването на модела, генерирането на изображения се осъществява последователно с определен брой стъпки за генерация. На фиг.1 може да се види последователност от изображения, генерирани със ключовата дума “cat”, в рамките на 20 стъпки. Първите стъпки от генерацията на практика се доближават до Гаусов шум.



Фиг. 1

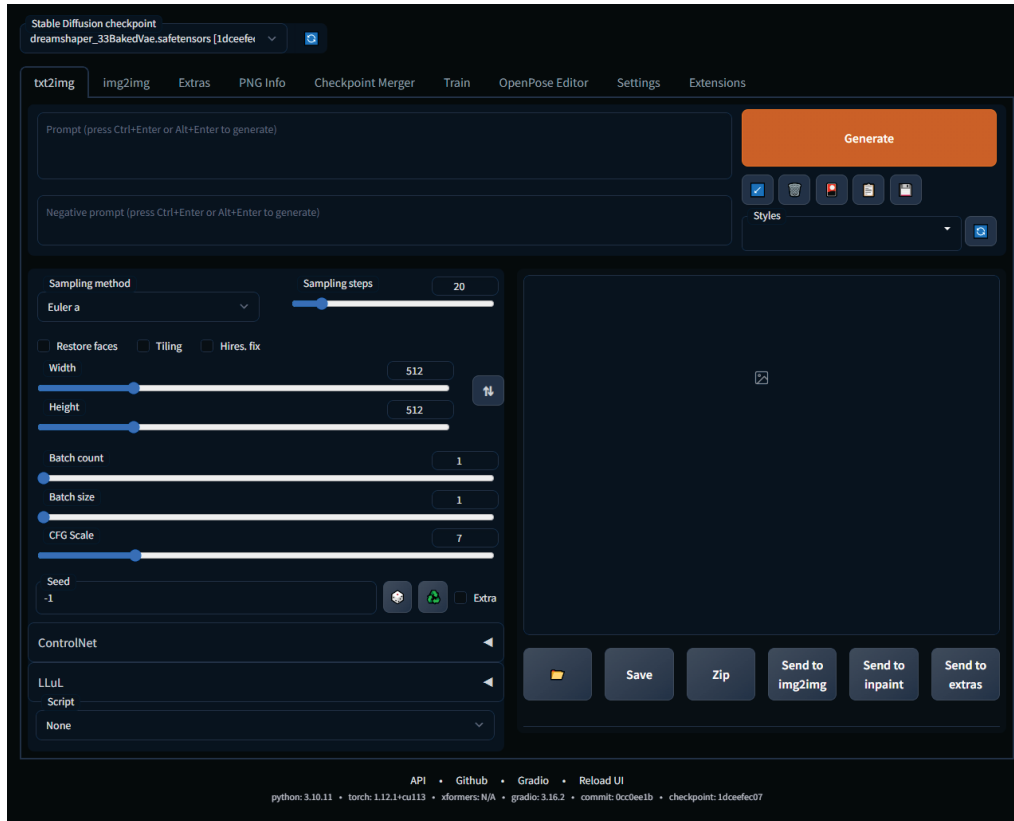
Доста от моделите, които са създадени за Stable Diffusion, биват впоследствие използвани от платени Web базирани услуги

за генерация. Един от малкото генератори на снимки, базиран за работа с локална машина, е Stable Diffusion Web UI - браузър



базиран интерфейс използващ видеокарта-
та на потребителя за генериране на изобра-

жения. На фиг. 2 е представен изгледа на
това приложение.



Фиг. 2

Пример за приложение на изкуствения интелект в архитектурата

Като пример за приложение на изкуст-
вен интелект може да се представи осъвре-

меняване на архитектурен изглед на съще-
стваща сграда. За целта е избрана сним-
ка на ректората на Технически университет
– Габрово (фиг. 3)



Фиг. 3



С помощта на Stable Diffusion и архитектурен модел, трениран върху изгледа на сгради могат да се получат футуристични изображения на ректората, с добавени от модела изменения. На фиг.4 са представени няколко такива генерирани изгледа.



Фиг.4

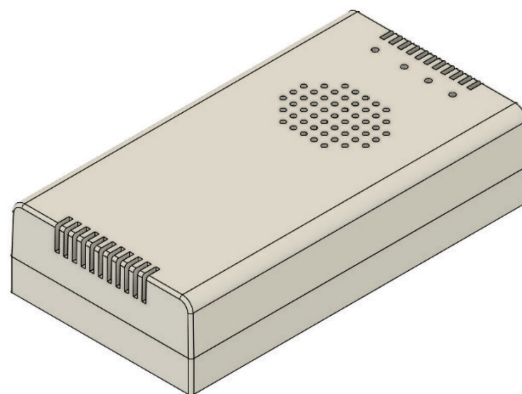
По този начин с помощта на изкуствения интелект могат да се получат различни интересни концепции за бъдещи архитектурни изменения във фасадата на сградата.

Пример за приложение на изкуствения интелект в индустриалния дизайн

При индустриалния дизайн е възможно да се получи интересна визуализация на различни модели на детайли. При съществуващ модел на детайл, създаден на база на някоя CAD програма, изкуственият

интелект може да предложи концепции за изменения в неговия външен вид.

На фиг. 5 е показан CAD модел на кутия за електронно устройство.



Фиг.5

С помощта на универсален AI модел са генерирани следните изменения в дизайна на кутията – фиг. 6.



Фиг. 6

Генерираните дизайни могат да се използват от разработчика за изменения в CAD файла, така че разработваното устройство (кутия за електроника) да придобие футуристичен изглед.

Пример за приложение на изкуствения интелект във дизайн на компютърни игри

При създаването на компютърни игри, дизайна и стила на героите са от голямо значение. При ясни ключови черти и излъчване, дизайнера може чрез помощта на



изкуствен интелект да генерира основния образ на героите – фиг. 7.



Фиг. 7

Генерирания дизайн е базиран на следните ключови условия, които са зададени като текстово описание към AI модела: брониран герой със студена тематика, светлоруса коса и сини очи. В последствие генерираните изображения могат да бъдат използвани от визуалния дизайнер на играта като основа за външния облик на героя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата работа са представени възможностите на съвременните модели за генериране на изображения, които могат да се използват в помощ на архитекти, инже-

нери и дизайнери. Въпреки, че моделите имат някои ограничения, то бързината, с която се създават, разнообразието на форми и способността на средите за генериране на изображения с различна степен на привързаност към входни данни, прави използването на изкуствен интелект в области като архитектура, изкуство и инженерни дейности изключително обещаващо.

БЛАГОДАРНОСТ

Тази работа е подкрепена от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Наука и образование за интелигентен растеж 2014 - 2020“, Проект CoS „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“, № BG05M2OP001-1.002-0023.

ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА

- [1] NVIDIA AI Playground: <https://www.nvidia.com/en-us/research/ai-playground/>
- [2] RunwayML: <https://runwayml.com/>
- [3] This Person Does Not Exist: <https://this-person-does-not-exist.com/>
- [4] ArtBreeder: <https://www.artbreeder.com/>
- [5] Stable Diffusion Web UI: <https://github.com/AUTOMATIC1111/stable-diffusion-webui>



**ПОЛУЧАВАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА СТРУКТУРАТА И
МЕХАНИЧНИТЕ СВОЙСТВА НА КОМПОЗИТНИ СЛОЕВЕ В
СИСТЕМАТА ТI-В ЧРЕЗ СКАНИРАЩ ЕЛЕКТРОНЕН СНОП**

**SYNTHESES, STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF
COMPOSITE LAYERS IN THE SYSTEM TI-B OBTAINED BY A
SCANNING ELECTRON BEAM**

Fatme Padikova

*Academician Emil Djakov Institute of Electronics – Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria
Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*

Daniela Nedeva

*Technical University of Gabrovo, Gabrovo,
Bulgaria*

Borislav Stoyanov

*Technical University of Gabrovo, Gabrovo,
Bulgaria*

Vladimir Dunchev

*Technical University of Gabrovo, Gabrovo,
Bulgaria*

Maria Ormanova

*Academician Emil Djakov Institute of
Electronics – Bulgarian Academy of Sciences,
Sofia, Bulgaria*

Georgi Kotlarski

*Academician Emil Djakov Institute of
Electronics – Bulgarian Academy of Sciences,
Sofia, Bulgaria*

Stefan Valkov

*Academician Emil Djakov Institute of
Electronics – Bulgarian Academy of Sciences,
Sofia, Bulgaria
Technical University of Gabrovo, Gabrovo,
Bulgaria*

Abstract

Due to their excellent functional properties, Ti-based alloys are used in various industries and medicine. Titanium-based composite layers, such as TiB, are characterized with very high hardness values. In this work, surface layers in the titanium-boron system were formed by electron-beam treatment. A mixture of boron powder and acetone, in ratio 1:1 was evenly deposited on the top of the Ti substrates and after drying and evaporation of the acetone, a homogeneous boron film was formed. The thickness of deposited film is approximately 8 μm . The electron beam surface treatment is performed via means of a scanning electron beam Evobeam Cube system. The technological conditions were applied: accelerating voltage – 60 kV; beam current – 18 mA; scanning frequency – 200 Hz; circular deflection geometry. During the process, the speed of the movement of the specimens was 4 mm/s and 6 mm/s. The phase composition, microstructure and chemical composition were investigated by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX). The hardness of the obtained samples was determined by a Vickers hardness tester. The results obtained for the mechanical properties of the composite layers are discussed concerning the applied technological conditions and formed phase composition and microstructure.

Keywords: Ti-based alloy; titanium boron; electron-beam treatment; composite layer.



ВЪВЕДЕНИЕ

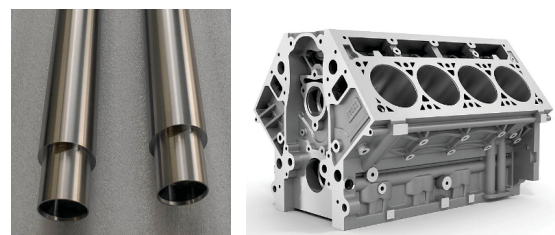
Поради отличните си експлоатационни свойства, сплавите на основата на Ti се използват в различни отрасли на промишлеността и медицината. На фигура 1 са представени някои от потенциалните практически приложения на този материал. Въпреки това, биха могли да се отбележат някои недостатъци, такива като ниска твърдост [1-5]. Съществуват различни методи за тяхното преодоляване, като най-подходящите са техниките за модифициране на структурата и свойствата на материалите на повърхността, тъй като там те са изложени най-активно на експлоатация.

Електроннолъчевите методи за повърхнинна модификация са сред особено перспективните днешно време. Те се характеризират с редица преимущества пред конвекционалните такива поради изключително краткото време на процеса, равномерното разпределение на енергията на електронния лъч, възможността за много точна повтораемост. Също така, този метод се характеризира с минимални разходи. При тези технологии, кинетичната енергия на електроните се трансформира в топлина, което довежда до формиране на температурно поле от повърхността в дълбочина на материала. Технологичните условия на процеса могат да бъдат подбрани така, че обработената повърхност да бъде разтопена – формиране на течна фаза (течна вана). При въвеждане на легиращи елементи в течната фаза и последващото ѝ втвърдяване се формират композитни слоеве и покрития със значително подобрени експлоатационни свойства в сравнение с основния материал (подложка) [6, 7].

Композитните слоеве на титанова основа, като TiB, се характеризират с много ви-

соки стойности на твърдост и са изключително перспективни за подобряването на споменатия механичен показател [8].

Авторите на [9, 10] са провели изследвания върху възможностите за модифициране на композитни титанови матрици чрез въвеждане на TiB₂ частици и получават значително увеличаване на микротвърдостта. В други изследвания са представени резултати от електроннолъчева повърхнинна модификация на титанови подложки със слоеве от алуминий и ниобий, като също се наблюдава повишаване на гореспоменатия механичен показател. Важно е обаче да се отбележи, че изследвания върху модифицирането на титанови подложки с бор, както и възможностите за получаване на композитни повърхнинни структури в системата Ti-B са към момента доста слабо изучени. Поради тази причина, целта на настоящото изследване е да се изучат възможностите за получаване на композитни покрития в системата Ti-B, притежаващи значително повишена твърдост по отношение на основната титанова подложка.

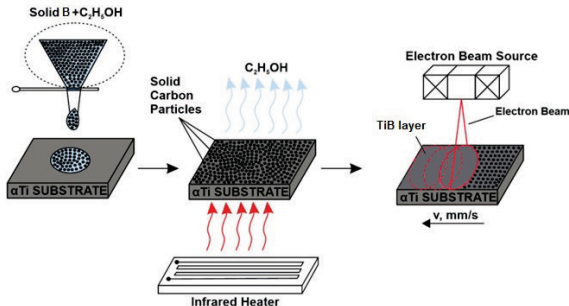


Фиг. 1. Приложение на титанови материали

ИЗЛОЖЕНИЕ

В тази работа повърхнинни слоеве в системата титан-бор бяха получени чрез електронно-лъчева обработка. Смес от боров прах и ацетон в съотношение 1:1 беше равномерно нанесена върху горната част на подложките от Ti и след изсушаване и

изпаряване на ацетона се образува хомогенен боров филм. (фиг. 2)



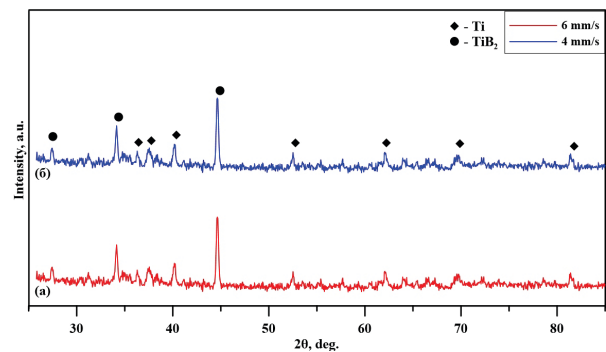
Фиг. 2. Схема на технологията за електроннолъчева модификация за получаване на покрития в системата Ti-B.

Дебелината на нанесения филм е приблизително 8 μm . Електроннолъчевата обработка на повърхността е извършена посредством сканираща електроннолъчева система Evobeam Cube. Приложени са следните технологични условия: ускоряващо напрежение - 60 kV; ток на лъча - 18 mA; честота на сканиране - 200 Hz; кръгова геометрия на отклонението. По време на процеса скоростта на движение на образците е 4 mm/s и 6 mm/s. Фазовият състав, микроструктурата и химическият състав бяха изследвани чрез рентгенова дифракция (XRD), сканираща електронна микроскопия (SEM) и енергийно-дисперсионна рентгенова спектроскопия (EDX). Твърдостта на получените образци е определена с твърдомер на Викерс.

РЕЗУЛТАТИ

На фигура 3 са представени експериментално получените рентгенови дифрактограми на изследваните образци. Измерванията са реализирани в ъглов диапазон от 25° до 85° в скала 2 θ . Получените свидетелстват за двуфазна структура. Наблюдават се дифракционни максимуми, съответ-

стващи на поликристалните фази Ti, както и TiB₂ и в двата случая на скорост на движение на образеца по време на електроннолъчева обработка. Следователно, би могло да се заключи, че гореспоменатият технологичен параметър на технологията за електроннолъчева модификация не влияе на фазовия състав на получените покрития при ток на електронния сноп от 18 mA и ускоряващо напрежение от 60 kV. Също така, установено е, че не се наблюдават значителни отмествания на дифракционните пикове в зависимост от скоростта на движение на образеца, което означава, че промяната на този технологичен параметър не води до промяна на междуплоскостните разстояния, както при фазата Ti, така и при TiB₂. Следователно, параметрите на елементарните клетки на двете фази остават също непроменени. Може да се заключи, че допълнителни остатъчни напрежения, в следствие на промяната на скоростта на движение на пробите не се наблюдават.

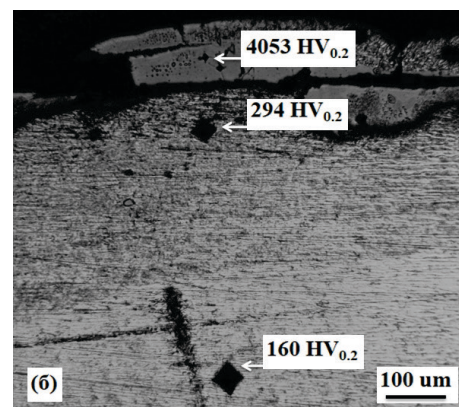
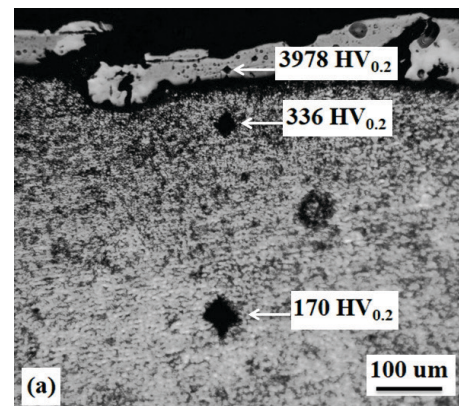


Фиг. 3. Рентгенова дифрактограма на получените образци.

На фигури 4 (а) и 4 (б) са представени изображения, получени чрез оптичен микроскоп на напречен срез на получените покрития при скорости на движение на образеца от 6 и 4 mm/s, съответно. Вижда се, че и в двата случая е формирано покри-



тие в системата Ti-V, което е в съгласие с резултатите, получени чрез рентгеноструктурен анализ (фигура 3). Покритието получено чрез използване на по-високата скорост на движение на образца (6 mm/s) се характеризира с по-малка дебелина, като е установено, че тя е от порядъка на 50 μm . Покритието, което е получено чрез по-ниската скорост на движение на пробата (4 mm/s) е около 100 μm , което е около 2 пъти по-голяма дебелина в сравнение с дебелината получена при електроннолъчева модификация с по-ниската скорост на движение на образца. Дискутираният в тази статия параметър има важно отношение върху количеството въведен материал в течната фаза. Въвеждането и разпределението на легиращи елементи на повърхността на електроннолъчево обработени повърхности се базира на интензивна конвекция тип Марангони, която е причинена от високотемпературния градиент в течната фаза [11, 12]. В този случай, интензивни конвекционни потоци действат от повърхността към дълбочината, като те са отговорни за преноса и разпределението на елементите в течната вана. В случай на по-ниска скорост, температурата е по-ниска, което кореспондира към по-нисък температурен градиент, където конвекционните потоци не са толкова силно изразени, в сравнение с обработката при по-високата скорост. Следователно, по-малко количество от В прах е бил въведен в титановата подложка и покритието, получено при 6 mm/s скорост на движение на образца е по-тънко. Важно е също да се отбележи, че и в двата случая на обработка, под полученото покритие се наблюдава издробенна зона, известна още като зона на термично влияние.



Фиг. 4. Измерване на микротвърдост на образците със скорост на движение на образца : а) 6 mm/s ; б) 4 mm/s

Изследвана е и микротвърдостта на получените образци, като за тази цел е използван методът на Викерс при натоварване от 200 грама. Получените резултати свидетелстват за формиране на покрития в системата Ti-V с изключително високи стойности на гореспоменатия механичен показател. Измерените стойности на микротвърдостта на получените покрития и в двата случая са около 4000 $\text{HV}_{0.2}$, което значително надвишава тази на основната



титанова подложка. Резултатите показват, че микротвърдостта, измерена в зоната на термично влияние, както и тази на титановата подложка е значително по-ниска. Стойностите, получени в основния титанов материал са около 160-170 HV_{0.2}. Това означава, че микротвърдостта на получените покрития в системата Ti-B е повече от 20 пъти по-висока от тази на основния титанов материал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получените резултати показват възможността за получаване на слоеве от титанов борид върху подложки от Ti чрез електроннолъчева повърхнинна модификация. По време на експериментите е използвана кръгова геометрия на сканиране. Мощността на електронния сноп беше 1080 W. Скоростта на движение на образците по време на електроннолъчевата повърхнинна модификация беше 4 и 6 mm/s, съответно. Получените резултати показват, че електроннолъчевата повърхнинна модификация, реализирана при гореспоменатите технологични условия води до образуване на композитен слой от Ti-TiB₂. Измерената микротвърдост на образуваните композитни слоеве е около 4000 HV, което е 20 пъти по-високо от това на основния субстрат от Ti.

Благодарности:

Настоящите изследвания са свързани с изпълнението на задачи по проект BG05M2OP001-1.002-0023 - Център за компетентност „Интелигентни, мехатронни, еко-и енергоспестяващи системи и технологии”.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Lin, Y.; Wang, H.; Zhang, M.; Lin, H.; Yan, D.; Lin, Q.; Kang, X.; Wang, X. Gradient Coating of Laser Cladding TiB₂/Ti-Based

Alloy on Titanium Alloy Surface. Coatings 2023, 13, 743.

- [2] Jiang, H.; Zhao, X.; Song, H.; Li, C. The Effect of High-Velocity Air-Fuel WC-12Co Coatings on the Wear and Corrosion Resistance of TC18 Titanium Alloy. Coatings 2023, 13, 755.
- [3] Bravo Barcenas, D.I.; Chávez Aguilar, J.M.; Jiménez Alemán, O.; Olmos Navarrete, L.; Flores Jiménez, M.F.; González Al-barrán, M.A.; Farias Velázquez, I.G. Microstructure and Mechanical Properties of Ti-TiH₂ Based Matrix Composites Reinforced with xTiB₂ Particles Processed by Powder Metallurgy. Coatings 2023, 13, 587.
- [4] Chen, Y.; Lv, H.; Zhang, Z.; Tao, S.; Xie, S.; Li, J.; Liu, Y.; Chen, H. Influence of Medium-High Temperature Annealing on Microstructure and Properties of High-Power Laser Melting Deposited Ti-6Al-4V Alloy. Coatings 2023, 13, 202.
- [5] Avcu, Y.Y.; Iakovakis, E.; Guney, M.; Çalım, E.; Özkılınç, A.; Abakay, E.; Sönmez, F.; Koç, F.G.; Yamano ğlu, R.; Cengiz, A.; et al. Surface and Tribological Properties of Powder Metallurgical Cp-Ti Titanium Alloy Modified by Shot Peening. Coatings 2023, 13, 89.
- [6] Valkov, S.; Ormanova, M.; Petrov, P. Electron-Beam Surface Treatment of Metals and Alloys: Techniques and Trends. Metals 2020, 10, 1219.
- [7] Valkov, S.; Ormanova, M.; Petrov, P. Surface manufacturing of materials by high energy fluxes. In Advanced Surface Engineering Research; Chowdhury, M.A., Ed.; IntechOpen: London, UK, 2018; pp. 69–87.
- [8] Zhang, X.; Lü, W.; Zhang, D.; Wu, R.; Bian, Y.; Fang, P. In Situ Technique for Synthesizing (TiB+TiC)/Ti Composites. Scr. Mater. 1999, 41, 39–46.
- [9] Lin, Y.; Wang, H.; Zhang, M.; Lin, H.; Yan, D.; Lin, Q.; Kang, X.; Wang, X. Gradient Coating of Laser Cladding TiB₂/Ti-Based Alloy on Titanium Alloy Surface. Coatings 2023, 13, 743.



- [10] Bravo Barcenas, D.I.; Chávez Aguilar, J.M.; Jiménez Alemán, O.; Olmos Navarrete, L.; Flores Jiménez, M.F.; González Albarrán, M.A.; Farias Velázquez, I.G. Microstructure and Mechanical Properties of Ti-TiH₂ Based Matrix Composites Reinforced with xTiB₂ Particles Processed by Powder Metallurgy. Coatings 2023, 13, 587.
- [11] Chan, C.; Mazumder, J.; Chen, M. A two-dimensional transient model for convection in laser melted pool. Metall. Trans. A 1984, 15, 2175–2184
- [12] Valkov, S.; Petrov, P.; Lazarova, R.; Bezdushnyi, R.; Dechev, D. Formation and characterization of Al-Ti-Nb alloys by electron-beam surface alloying. Appl. Surf. Sci. 2016, 389, 768–774.



УПРАВЛЕНИЕ НА ИНДУСТРИАЛНА ПОТОЧНА ЛИНИЯ

INDUSTRIAL ASSEMBLI LINE OPERATION

Albena Taneva

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

Desislava Atanasova

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

Krum Kutrynski

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

Michail Petrov

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

Abstract

The idea of this paper is to present basic components of a flexible assembly system (FAS), discuss its characteristics, classify the systems and describe an application. This equipment offers professional training according to the industrial reality, simulating a real assembly process and including different technologies from Industry 4.0. The FAS consists of an automated flexible assembly cell with five different stages: assembly, handling, quality inspection, transfer and warehouse. It is the ideal answer to research and training in industrial automation. 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 professional skills required by advanced automation. In this work the conventional control approach is presented with programmable logic controllers (PLC) and SCADA level.

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

INTRODUCTION

Smart Manufacturing is considered as a new paradigm that makes work smarter and more connected, bringing speed and flexibility through the introduction of digital innovation [1]. Today, digital innovation is closely linked to the “sustainability” of companies. Digital innovation and sustainability are two inseparable principles which are based on the concept of circular economy. Digital innovation enables circular economy model promoting the use of solutions like digital platforms, smart devices, artificial intelligence that help to optimize resources.

The main part of Smart Manufacturing are flexible assembly systems [2]. A flexible assembly system 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. The FAS is capable of simultaneously assembling 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 [3].

The aim of this paper is to present basic hardware components of a flexible assembly system and discuss its characteristics, classify the systems and describe some real applications. 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 [7], [8].



AUTOMATED INDUSTRIAL SYSTEMS

The fully automated manufacturing environment has been the ultimate goal of industrial companies that for a few decades already [4]. The idea was first put forward with the rise of the Computer Integrated Manufacturing (CIM) [5] in the early 1980s. Nowadays sophisticated communication technologies, big data analytics, Industry 4.0 technologies and integrated electronic components and modules enable automation possibilities and the realization of new business models [6]. 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, FAS is pivotal as shown in the next section.

ASSEMBLY SYSTEM DESCRIPTION

It is described a training equipment in mechatronics connected with Industry 4.0 technologies. This is a flexible assembly system FAS – 200, installed at laboratory of *Intelligent Automation Manufacturing Systems* in the new Centre of Competence “*Smart Mechatronic, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies*”.

FAS 200 [7] 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 and handling automatisms, 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 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 modules are located in a side of the linear transfer, and may be withdrawn for re-positioning in a different order (the repositioning of different modules of the system can mean repositioning of stoppers, lifters-positioners and reprogramming of the controllers of the system), moved for future extensions or work in completely independent, in a single mode, or with its complementary module in a couple mode (requiring reprogramming of the control). Each station has its own electrical panel, where the wiring system and PLC 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 with different PLCs and subsequently integrate them in the station. They can 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. The modules are mounted on aluminum sections, which are tables with a large surface area and multiple slots. This allow all types of extension and modification. The assembly process performed is as follows:

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

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

Process C: Press bearing in hydraulically.

Process D: Pick and place shaft and verification of its orientation and material.

Process E: Pick and place cover and verification of its orientation, material and color.

Process F: Fit screws.

Process G: Robot screw driving.

Process H: Quality control by artificial vision.

Process I: Unloading, storage and palletization of final assembly.

In addition to transport processes between with a linear conveyor.

Transfer and vision inspection module

The transport system, fig.1 is composed by long lines including five modules to facilitate the envisaged assembly process.



Fig. 1. Linear transfer module.

Different layouts can be defined for future expansions. The transfer follows a rectangular path or linear path. The master PLC controls and coordinates the rest of the PLCs connected to the network and it is located in the “body feeding and checking” station. There is a longitudinal channel in one side of each module and of the linear transfer to provide the electrical power connections and the air supply connections between the different stations (and in the communication connections). The modular transfer incorporates a pallet assembly to transport parts and assemblies across the handling stations. The pallets and the transfer stoppers



incorporate 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 body is going to the first of two inspection positions, and a vision camera confirms the color and presence of the shaft, the height, the color and the presence of the cover and the presence of two of the four screws, fig. 2. The system is used with monitoring purposes, based on an open-loop concept. Then it rotates to the second inspection position and the vision system confirms the presence of the remaining two screws. If the inspection results are good, the turning mechanism is returned to the pallet retained at the transfer. The vision system consists in a vision sensor with integrated camera and controller. It can be used to easily achieve simple inspections and measurements.



Fig. 2. Vision system.

Feeding and transferring module

This feeding module feeds the bearing which is going to be placed inside the housing formed in the body by the next module. Also, this module transfers, fig.3 the bearing to the measurement position located on the next module, where the height is measured to differentiate between the two sizes of bearing.

The feeding operation begins when the

pallet is positioned opposite to the next module. The pallet is held in a determined location by a stopper and a positioner-lifter on the linear transfer. Confirmation that the pallet is in the correct position is provided by a microswitch which sends the appropriate signal to the PLC of the next module which in turn sends the signal “start cycle” to the PLC of feeding module.

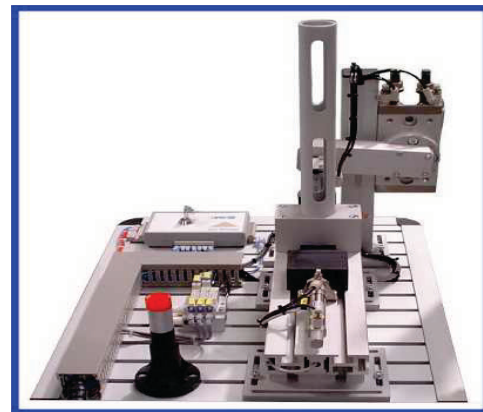


Fig. 3. Manipulators of the feeding module.

The feeding module, like the others, may be divided into a series of manipulators. Each sub-module has been made as a set of components which performs a specific operation within the whole assembling process carried out at the module. The feeder which supplies the bearing is of the gravity feed type. The bearings are stored in a column. The next bearing is extracted at the moment the cycle starts, so when the bottom bearing is removed, the next falls into the place under the its own weight and that of the ones above it. In this case, a sensor in the form of a microswitch checks for a bearing presence. This allows the PLC to verify that the bearing really has been extracted after the feeding procedure. This way it is possible to determine when the bearings loaded in the feeder have run out. A manipulator moves the bearing from the feeding position to the place where the height measuring operation in the next module will be performed. The



manipulator uses a rack and pinion type rotary actuator which describes an angle of 180° . To the rotary actuator it is attached an arm, which moves a two-finger parallel-opening gripper which grips the inner part of the bearing. This arm houses a mechanism consisting of a toothed belt and two pinions. The purpose is to keep the gripper orientation throughout the turning movement, so that it can reach the measuring point in horizontal position.

Measuring and transferring module

The measuring module is complementary to the previous one. It is measured in this module the height to differentiate between the two sizes of bearings, fig. 4. This module rejects the bearing or places it inside the housing of the body on the pallet, depending of the signal “tall bearing” or “short bearing”. The confirmation of the bearing has got the correct height is got by a linear potentiometer like a measurer turning on an internal flag of the PLC, signal “tall bearing” or “short bearing”.

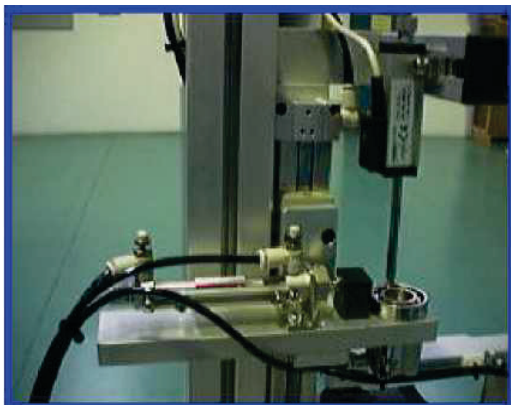


Fig. 4. Measuring manipulator

When the pallet is positioned opposite the module this operation begins. The pallet is held in a determined location by a stopper and a positioner-lifter on the linear transfer system. When the PLC of the third module sends the signal “end cycle” to the PLC of this fourth module. The task of placing the

bearing is performed on the pallet brought by the belt conveyor and carrying the body fed and assembled by the previous modules. The bearing fitting operation requires the pallet carrying the body to be precisely situated in a predetermined place. To achieve this precision, once the pallet has been retained by a stopper, it is lifted by a pneumatic cylinder and centered at the same time by four pins which fit inside housings formed for this purpose in the bottom of the pallet.

The measuring module, like the others, could be divided into a series of manipulators. Each sub-module has been made by considering it as a set of components which performs a specific operation within the whole process carried out at the main module.

- Measurement of height:

The module allows the possibility of feeding bearings of different heights, because a measuring manipulator is included to measure the height and to select them. The bearing is placed on a platform, with a centering device operated by a pneumatic cylinder which locates it at a very precise position. That is needed to perform the correct measurement of the height. This platform is lifted by a rod less pneumatic cylinder. This way the bearing contacts a touch sensor and gives the height reading. The touch sensor consists of a linear potentiometer with an output, connected with an analogue module, included in the PLC. The lifter returns to its original position after measurement. After that, a cylinder pushes the bearing towards a ramp, in case the height does not correspond to the selected one. The final operation is performed by a manipulator. It comprises a rotary-linear system, with an arm to which a two-finger gripper has been fitted. After picking up the bearing, the arm goes up, turns through 180° and then goes down again to insert the bearing in the housing of the body.



Cover classification module

The fourth of the components to be assembled in the system FAS200 is a cover which is fitted into a housing formed on the body for this purpose, fig. 5. The cover serves to retain the turning mechanism shaft mounted at the previous modules. While the preceding modules saw the introduction of a variant in the form of different materials for the shaft, this module increases the number of variants by offering the choice of three different materials for the cover: aluminum, white nylon and black nylon, in addition to a choice of two different cover heights, giving a total of six possible combinations for this particular assembly task. The need for appropriate checks to determine which type of cover is to be assembled at each module cycle means that this module is one of the most complex in terms of the operations to be carried out. It is also essential that the module control coordinates part selection operations in accordance with the commands supplied by the master responsible for production management in the FAS-200. This classification module feeds the cover which is the closure cap for the turning mechanism, and verifies its material, color and height.



Fig. 5. Manipulators of the cover classification module.

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”. The confirmation of the cover is the correct one (material, color and height) is got by some sensors (an inductive detector, a photoelectric detector and a pneumatic cylinder with stroke reading) turning on some internal flags of the PLC, the previously mentioned signals. This operation begins when the pallet is positioned opposite the module, held in a determined location by a stopper on the linear transfer system. Confirmation that the pallet is in the correct position is provided by a microswitch which sends the appropriate signal to the PLC of the module which sends the signal “start cycle” to the PLC of this module. The feeding module, like the others, may be divided into a series of manipulators. Each sub-module has been made by considering it as a set of components which performs a specific operation within the whole assembling process carried out at the module.

- Index plate:

This element is used as a system of alternating rotary movement, in the sense that each turning movement moves the plate round by a number of degrees equal to the circumference divided by the number of defined positions. In this case, it is a plate of 8 different positions. To achieve this effect, the system incorporates a pneumatic pusher cylinder with back and forth movement giving the required angular advance. There are a further two stop cylinders which function alternately, one moving which holds the plate during the turn, and another fixed cylinder which locks the plate in position when movement has ceased. In this way, the plate is held firmly and the pusher cylinder can return to its initial position to await a new cycle.



- Cover feeder:

The covers stored in a gravity type feeder are deposited on the first plate position via a step-by-step feed system involving two pneumatic grippers. These grippers are in a permanent counterpoise position, so that while the lower one releases the next cover from the feeder, the upper one holds the rest in place. A presence sensor in the form of a fiber optic detector allows the PLC to verify that there is really at least a cover in the feeder to continue the feeding procedure. This makes it possible to determine if the covers loaded in the feeder have run out.

- Cover measuring position:

The fact that covers of two different heights may be assembled necessitates a height measuring device. Owing to the teaching and training objective for which the cell has been designed, various solutions have been used to perform similar operations, so that while components such as pneumatic cylinders with correct height detectors or analogue output touch probes have been employed at other modules, this particular module uses a digital transducer which provides a pulse output, as it is a linear encoder. The component used consists of a pneumatic cylinder which moves the probe until it touches the cover. An integral linear encoder in the cylinder sends pulses which are counted by a quick counter input at the PLC, making it possible to determine the distance the cylinder advances until it contacts the cover. This information allows direct determination of the height of the cover.

- Material detection position:

As described above, this module offers the possibility of working with aluminum, white nylon and black nylon respectively. To differentiate these types, the next index plate position is fitted with an inductive detector and a photoelectric detector which supply the necessary signals to the PLC.

Detection of the metal covers necessitates the use of an inductive sensor, which supplies a signal when the part detected is made of metal. The final cover differentiation process is that between black and white nylon, and for this purpose a photoelectric cell as in figure is fitted. This component only detects white-colored nylon covers.

Cover rejecting and transferring module

This module, fig. 6 is complementary to previous one. This module 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. This operation begins when the pallet is positioned opposite the module, held in a determined location by a stopper on the linear transfer, and when the PLC of the module sends the signal “end cycle” to the PLC of this module. The task of placing the cover is performed on the pallet brought by the belt conveyor and carrying the body-bearing-shaft assembly fed and assembled by the previous modules. The cover fitting operation requires the pallet is stopped and retained by a stopper.

The tenth module, like the others, may be divided into a series of manipulators. Each sub-division has been made by considering it as a set of components which performs a specific operation within the whole process carried out at the module.

- Rejection of incorrect cover:

If the cover reaches the last-but-one index plate position (on the previous module), and the various material or height sensors have indicated that it is not of the material or height indicated by the main controller in charge of production of the system.

FAS 200, then it must be rejected. This operation is implemented at this module by a two-cartesian axes manipulator, which picks the cover off the index plate and deposits it on a removal ramp if the corresponding signal is received.



Fig. 6. Cover rejecting and transferring module.

The manipulator comprises two pneumatic parallel rod cylinders, at the end of which is a suction plate with three vacuum-holding cups.

- Cover insertion:

Cover insertion, carried out from the last of the index plate position (on the previous module), is performed by a rotary-linear type manipulator. This rotary-linear cylinder makes it possible for a single component to pick up the cover, take it to the unloading point and insert it. The cylinder offers the possibility of independently commanding rod in stroking and out stroking as well as turns to left or right. It is this cylinder which turns an arm fitted with a parallel opening gripper used to holds the cover throughout the movement, which is lifted and turned towards the unloading point by a rotary-linear pneumatic actuator.

Warehouse module

Once the final assembly is completed, the warehouse module has to be removed from the transport system. This storage module, fig. 7 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. The storage module,

like the others, may be divided into a series of manipulators. Each sub-division has been made by considering it as a set of components which performs a specific operation within the whole process carried out at the module.

- Vertical axis:

The system of holding the components of turning mechanism consists of parallel rod cylinder equipped with a plate including four suction cups which to hold the assembly until it is positioned at its storage point.

- Positioning axes:

The first operation consists of placing the vertical axis mentioned above over a fixed pick-up point over the place where the pallet is stopped.



Fig. 7. Manipulators of the warehouse module.

This operation is carried out by two shafts: one of them is a pneumatic actuator and the other one is a positioning shaft driven by servomotor with absolute encoder to provide instantaneous reading of motor rotation, achieving the precise regulation of position and speed via their corresponding driver which set up a closed loop position regulation system. This involves encoder feedback and the position setpoint required at any particular moment supplied by the PLC controlling the module.



ASSEMBLI LINE OPERATION

During operation with the flexible assembling system they are used functional PLCs software programs implemented like structural function codes, evident from fig. 8. It is used KEPServer for devices communication and SCADA system, fig.9. All stations are presented as clients: FAS 203, FAS 204, FAS 209, FAS 210, FAS 216. Next figure presents the device parameters for the first station with PLC S7-1200 and defined IP address. The Input and Output assignment is presented on fig.11. These are addresses used in user program for system functionality.

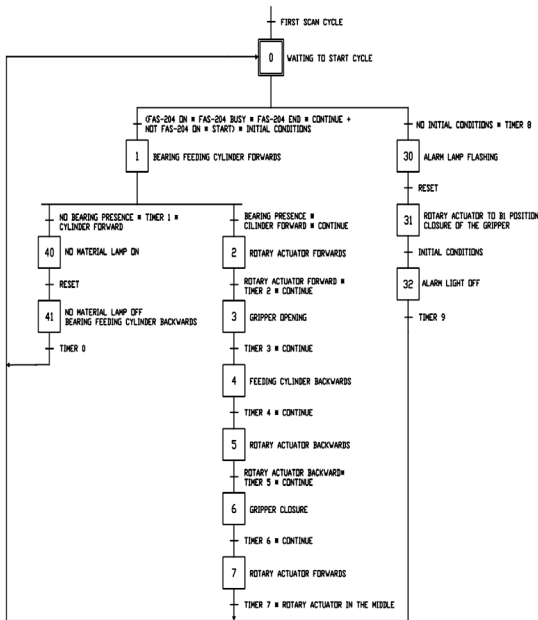


Fig. 8. Program for the feeding module.

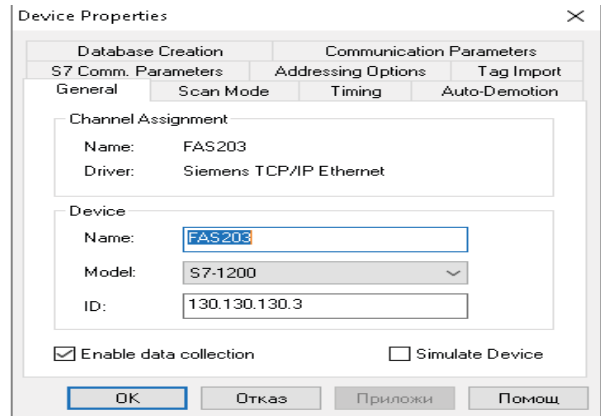


Fig. 10. The FAS 203 station parameters

Tag Name	Address	Data Type	Scan Rate	Scaling	Description
FAS203_in0	MW300	Word	100	None	Info from the PLC
FAS203_in1	MW302	Word	100	None	Info from the PLC
FAS203_out	MW310	Word	100	None	Info to the PLC

Fig. 11. I/O assignment.



Fig. 12. SCADA main screen

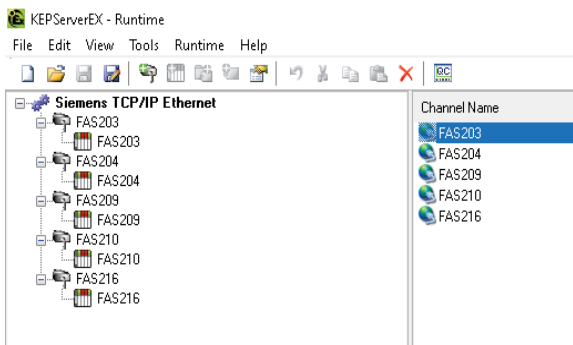


Fig. 9. Setting the modules as clients in KEPServer



Fig. 13. All modules in the project

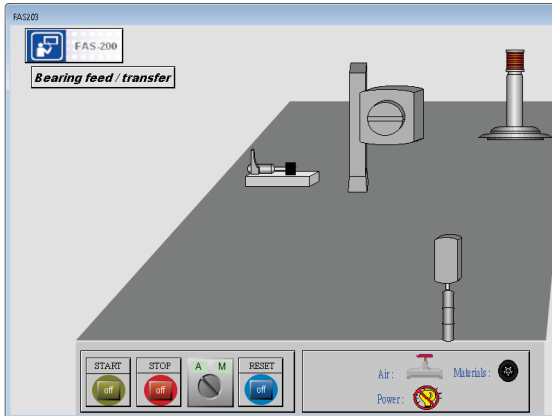


Fig. 14. Screen for monitoring and control of the first module, FAS203

The prepared SCADA project with Omron software CX-Supervisor is presented. On fig. 12 the main screen is given and operating can be started. The monitoring and control for the first module is presented on the fig. 14. It is for feeding stage of the manufacturing system. The quality control, sorting and rejection are shown on fig. 15. Respect to the user definition and selected options this module operates. The next station includes different covers for parts and can be predefined and selected from three types. Fig. 16 general screen for cover classification and table with positioned covers.

The assembly stage is presented with screen on fig. 17. At this step can be make rejection as well as it is possible in module at FAS 204.

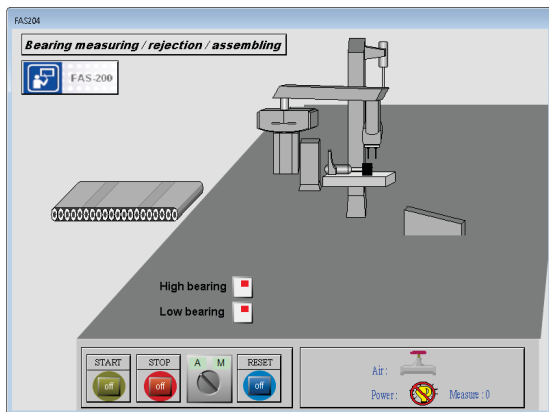


Fig. 15. Screen for quality control, FAS 204

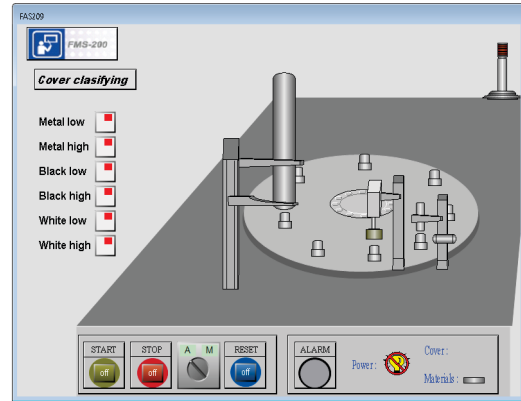


Fig. 16. Screen for covering, FAS 209

The last station is focused on placement of the ready production, fig. 18.

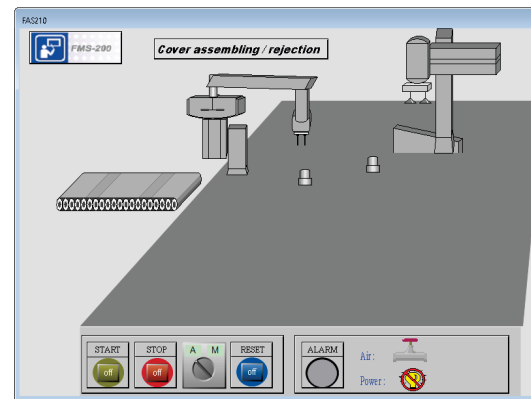


Fig. 17. Screen for assembling stage, FAS 210

The results obtained during operation of FAS 200 show a correct function of the system and software implementation. For this purpose, it is used a SCADA operational system for configuration, communication and monitoring of all system elements.

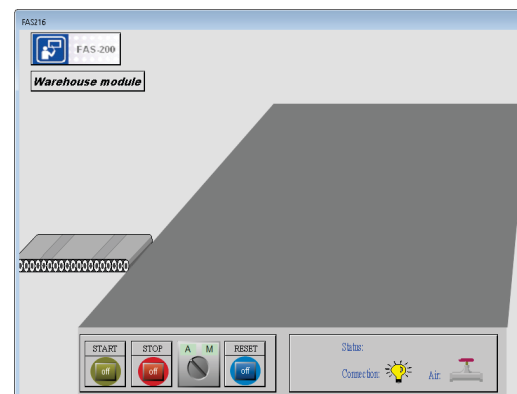


Fig. 18. Screen for warehouse storage, FAS 216



CONCLUSION

In recent years the manufacturers have invested most to the beginning and of the production process. To the designing stage by introducing of FAS systems and to production stage by modernization of production. FAS systems became standard by majority of manufactures, therefore if they still want to increase competitiveness, they have to increase efficiency, productivity and quality of production. This is main reason that technologically advanced countries focus on preparation and realization of modern manufacturing systems, mainly new.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to acknowledge the Centre of Competence “Smart Mechatronic, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies “.

REFERENCES

- [1] S. Liang and M. Rajora, “Intelligent Manufacturing Systems: A Review,” in *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research Vol. 7, No. 3, May 2018*, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/324598110>.
- [2] H. Elmaraghy, “Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms”, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol. 17, No. 4, pp. 261-276, 2005.
- [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] 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.
- [5] M.P. Groover, “Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing”, Harlow, Pearson Education, 2014.
- [6] Y. Cohen and col., “Assembly system configuration through Industry 4.0 principles: the expected change in the actual paradigms,” *IFAC Papers OnLine 50-1, 2017, 14958–14963*.
- [7] SMC Networks. FAS-200 User Manual. 2020, p. 97.
- [8] <https://www.smctraining.com/> SMC International Training.



РАСТЕЖ НА ГИГАНТСКИ МИЦЕЛАРНИ АГРЕГАТИ: КОЛИЧЕСТВЕНА ТЕОРИЯ И ЕКСПЕРИМЕНТИ

GROWTH OF GIANT MICELLAR AGGREGATES: QUANTITATIVE THEORY VS EXPERIMENTS

Krassimir D. Danov, Gergana M. Radulova, Mihail T. Georgiev, Peter S. Kralchevsky
*Department of Chemical and Pharmaceutical Engineering, Faculty of Chemistry and Pharmacy,
Sofia University "St. Kliment Ohridski", Sofia 1164, Bulgaria
KD@LCPE.Uni-Sofia.Bg*

Abstract

The concentrated surfactant solutions have a wide application in industry, oil recovery, drug delivery, turbulent drag reduction, etc. The competition between the companies-producers has led to use of new kind of formulations to improve: washing action; skin and eye irritation; stability and durability; biodegradability; tolerance to hard water. Here, we present a review on the state of the art and our contributions to the molecular thermodynamic theory and experiment on the growth of giant micellar aggregates. Despite the considerable advances in theory and computer simulations, agreement with experimental data has been achieved only in isolated cases. Our predictive molecular thermodynamic approach accounts for the different contributions to the micellar scission energy in the case of nonionic, zwitterionic and ionic surfactant solutions and their mixtures. Excellent agreement was achieved between the theoretical model and experimental data for wormlike surfactant micelles at various concentrations of salt and temperatures. At high salt concentrations, the model also predicts loss of chemical equilibrium, which implies a transition to self-assemblies of other morphology or the onset of crystallization and phase separation. The results have applications for the design of new products and nanostructured materials.

Keywords: surfactant micelles, wormlike micellar aggregates, scission energy, molecular thermodynamic theory.

INTRODUCTION

At higher concentrations, the molecules in solutions of surface-active substances (surfactants) self-assemble to form giant wormlike and branched micelles [1]. Under certain conditions, the branched micelles assemble into a multi-connected micellar network [2]. The measured significant increase of the solution viscosity (from 10^{-3} to 300 Pa.s) is explained with the formation and growth of wormlike micelles. These aggregates grow in the following three cases: in nonionic surfactant solutions at different temperatures [3]; in ionic surfactant solutions in the presence of salts [4]; in mixed solutions of surfactants that exhibit synergistic mixing [5]. The wide applications of micellar systems and varieties of formulations, from one side, and the strict practical rheological requirements need quantitative predictive models

for the self-assembly of molecules in complex solutions.

The fundamental problem in the physical chemistry is how to predict the size of the wormlike micelles on the basis of knowledge for the properties of the constituent molecules and their concentrations. Detailed literature review on the theory of wormlike micelles can be found in Ref. [6]. The majority of papers in this field is aimed at predicting the rheological behavior of micellar solutions at given micelle concentration, size distribution and kinetic parameters, such as the characteristic times of micelle breakage and reptation [7]. There are also studies on computer simulations of wormlike micelles by the Monte Carlo [8] and molecular dynamics [9] methods. The application of simulation methods is limited because of the large size of the wormlike micelles – typically, their aggregation number

ranges from thousand to million molecules.

Another powerful method is the molecular thermodynamic theory, which does not face any micelle-size limitations, and which is able, in principle, to predict micelle aggregation number and length, based on information about the molecular parameters and available experimental data for some collective properties, such as interfacial tension and activity coefficients [10]. The spherocylindrical (rodlike, wormlike) micelles (Fig. 1) are a basic type of self-assemblies formed in surfactant solutions. Their mean mass aggregation number, n_M , can be estimated from the expression:

$$n_M \approx 2[(X_S - X_S^0) \exp(E_{sc})]^{1/2} \quad (1)$$

Here: k_B is the Boltzmann constant; T is the temperature; X_S is the total molar fraction of surfactant in the aqueous solution; X_S^0 is the solution's critical micellization concentration (CMC); E_{sc} is the excess free energy (in $k_B T$ units) of the molecules in the two spherical micelle endcaps with respect to the cylindrical part of the micelle (Fig. 1). Because the breakage (scission) of a long spherocylindrical micelle to two smaller micelles leads to the formation of two new endcaps, E_{sc} was termed *scission energy* in relation to the reptation-reaction rheological model [7]. Thus, the main goal of the molecular thermodynamic theory is the prediction of E_{sc} .

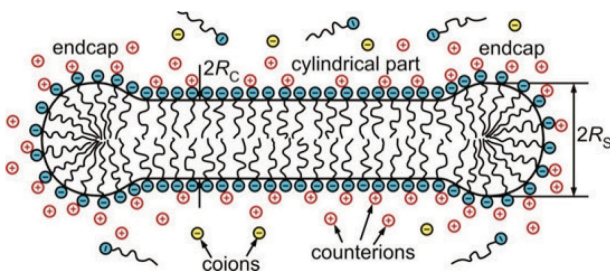


Fig. 1. Sketch of a spherocylindrical micelle from anionic surfactant; R_c and R_s are the radii of the micellar hydrocarbon core in the regions of the cylindrical part and the endcaps.

For the simplest case of single component spherocylindrical micelles, E_{sc} can be expressed in the following form:

$$E_{sc} = n_s(f_s - f_c) / (k_B T) \quad (2)$$

Here: n_s is the total aggregation number of the two micelle endcaps (with shapes of truncated spheres); f_s and f_c are the free energies per molecule in the endcaps and in the cylindrical part of the micelle, respectively (Fig. 1). For wormlike micelles, E_{sc} typically varies in the range 15–30 and n_s – in the range 60–120. Consequently, the difference $(f_s - f_c)$ varies in the range $0.125 - 0.5 k_B T$. In other words, to calculate correctly n_M , the molecular thermodynamic theory has to predict $(f_s - f_c)$ within accuracy better than $0.01 k_B T$, i.e., f_s and f_c have to be very accurately predicted. This is the main difficulty with the molecular thermodynamics of micelle growth.

In this article, we present our contribution in the field of growth of giant micellar aggregates and new theoretical and experimental results related to the crucial effect of electrostatic interactions between ionic and zwitterionic surfactant molecules on the size of their mixed micelles.

FREE ENERGY OF SURFACTANT MOLECULES IN MICELLES

Generally, the free energy per molecule, f_x ($x = s, c$), incorporated in the endcaps and in the cylindrical part of the spherocylindrical micelle contains six contributions:

$$f_x = (f_\sigma + f_{hs} + f_{conf} + f_{el} + f_{dip} + f_{d-c})_x \quad (3)$$

For a given molecule, their values are different because of the different confined space in spherical and cylindrical media. Thus, they depend also on the radii R_s and R_c .

Interfacial tension component, f_σ . This component is equal to the interfacial tension, σ , multiplied by the bare area per surfactant molecule in the considered environment at the boundary between the micelle hydrocarbon core and the outer water phase. The interfacial tension is calculated using the generalized Tolman equation [6,11].



Headgroups steric repulsion component, f_{hs} . The repulsion between surfactant headgroups at the micelle surface has been taken into account using the repulsion term in the two-dimensional multicomponent equation of van der Waals [11].

Chain-conformation component of free energy, f_{conf} . This contribution to the micelle free energy describes the variety of conformations of surfactant hydrocarbon chains in the finite space of the micelle interior. We derived the generalized version of the Semenov expression for the chain-conformation free energy per molecule in Refs. [11,12].

Electrostatic free energy, f_{el} . In the case of ionic surfactant in the presence of salt, the electrostatic component of the free energy is calculated from the solution of the Poisson-Boltzmann equation for all ionic species in the respective geometry [13,14]. The counterion binding effect and the ionic species activity coefficients are included in calculations. We proved [13], that f_{el} is equal to the micellar surface charge density multiplied by the surface electrostatic potential added with the electrostatic surface pressure (the contribution of the electric double layer to the surface pressure).

Dipole free energy, f_{dip} . From the viewpoint of the electrostatic interactions, the zwitterionic surfactant polar head is modeled as a dipole with dipole length d and area per molecule a_d . This component of the free energy includes the electrostatic interaction between dipoles in the vicinity of the micellar hydrocarbon core [15]. The effect of the micellar curvature and dielectric properties of the continuum media on the decrease of the dipole electrostatic interaction energy is well illustrated in Ref. [15].

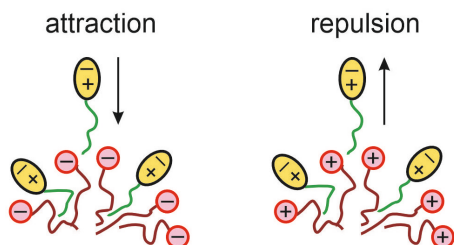


Fig. 2. Sketch of a zwitterionic molecule closed to a charged mixed micelle; the dipole-charge electrostatic interaction energy can be positive or negative.

Dipole-charge free energy, f_{d-c} . The zwitterionic dipole interacts with the electrostatic field in the electric double layer (Fig. 2) and the obtained expression for f_{d-c} reads:

$$f_{d-c} / (k_B T) = \pm 4\pi z_c z_d L_B d / a_d \quad (3)$$

Here: L_B is the Bjerrum length; z_c is the charge number of the ionic surfactant; z_d is the charge number of the dipole charges. The sign of f_{d-c} depends on the orientation of the zwitterionic dipole moment, so that this component corresponds to attraction or repulsion (Fig. 2) in the case of mixed ionic and zwitterionic micellar solutions.

The numerical calculations include minimization of the total free energy for spherocylindrical geometry of micellar aggregates (Fig. 1) under geometrical restrictions – the radii of spherical and cylindrical parts of the micelle hydrocarbon core must be smaller than the extended length of the surfactant hydrocarbon tail. As a result, the most probable radii R_s and R_c , number of molecules n_s , and the components of the free energy are obtained. Note that there are no adjustable parameters.

THEORY VS EXPERIMENTS

Nonionic surfactant micelles. Fig. 3 summarizes experimental data for the scission energy of wormlike micelles in the case of polyoxyethylene alkyl ethers, $C_n E_m$, with n carbon atoms and m ethylene-oxide groups [6]. The solid lines show the calculated values of E_{sc} from the proposed model. The agreement between theory and experiments is excellent.

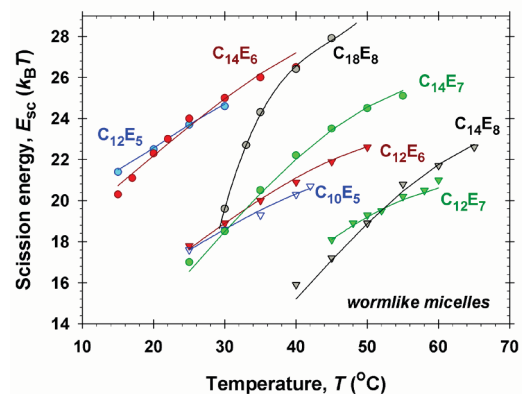


Fig. 3. Dependence of the scission energy of $C_n E_m$ micelles on temperature. Solid lines show the theoretical predictions.



The following conclusions can be drawn. The increase in temperature leads to a considerable increase in the aggregate size for all kinds of C_nE_m . Oppositely, the increase of the size of surfactant polar head (number of ethylene-oxide groups) decreases the values of the scission energy. As should be, the longer the surfactant hydrocarbon tail is, the larger the mean aggregation number and viscosities are.

Mixed micelles from nonionic surfactants. The surfactant mixtures consist of molecules with different alkyl chain lengths and/or different polar heads. Thus, it is nontrivial to guess preliminary what will be the result of mixing (ideal, synergistic or antagonistic mixing).

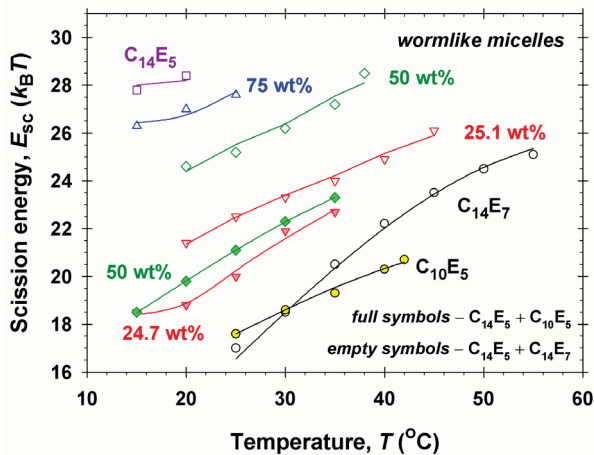


Fig. 4. Experimental data vs theoretical predictions for the dependence of E_{sc} for wormlike micelles in mixed solutions of $C_{14}E_5 + C_{10}E_5$ and $C_{14}E_5 + C_{14}E_7$ at different temperatures and weight fractions of $C_{14}E_5$.

In Fig. 4, the points are the experimental data for the micelle growth parameter, E_{sc} , versus temperature [11], whereas the solid lines represent the prediction of the theory for the respective composition of the surfactant mixture denoted in the figure. For both systems, identical alkyl chain $C_{14}E_5 + C_{14}E_7$ and identical headgroups $C_{14}E_5 + C_{10}E_5$, there is an excellent agreement between theory and experiment. For example, the scission energies of $C_{10}E_5$ micelles and $C_{14}E_7$ micelles at 30 °C are equal (Fig. 4) and one expects to have similar values for mixed solutions with $C_{14}E_5$ at 30 °C. In contrast, the

curves corresponding to almost equidistant weight fractions of $C_{14}E_5$ are far from being equidistant. This irregular behavior is related to the strong deviations from ideal mixing.

Ionic surfactant solutions in the presence of salts. The addition of salts considerably affects the formation and size of ionic surfactant micelles [1]. The comparison between the theory and experiments in the case of ionic surfactants is shown in Fig. 5 for: anionic surfactants – sodium undecyl (SUS), dodecyl (SDS), and tridecyl (STS) sulfate; cationic surfactants – dodecyl (DDAB), tetradecyl (TTAB), cetyl (CTAB) trimethylammonium bromides and respective chlorides (DDAC and CTAC) [14]. The added salts are NaCl and NaBr and the temperature is 30 °C for CTAB and 25 °C for the other surfactants.

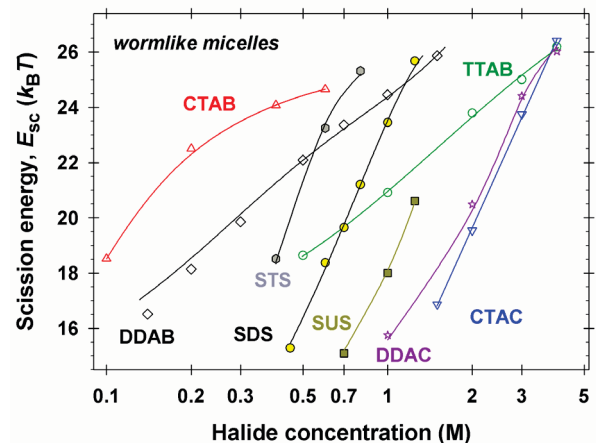


Fig. 5. Dependence of the micelle growth parameter of ionic surfactants on the added salt concentration: experimental data vs theoretical predictions.

The addition of NaCl to anionic SUS, SDS, and STS solutions sharply increases the scission energy and the longer the surfactant tail is the lower amount of salt is needed. The counterion binding effect is well pronounced for cationic surfactants. The energy of counterion binding of Br^- ions is higher than that of Cl^- ions, which explains the shift of the experimental data for DDAB compared to DDAC and for CTAB compared to CTAC. One sees that more than 10 times larger concentration of added NaCl (compared to NaBr) is needed to produce the



same degree of micellar growth for the studied cationic surfactants (Fig. 5). Experimental results show that CTAB micelles are rodlike for concentrations of added salt lower than 0.2 M and wormlike at higher concentrations. The excellent agreement between the theoretical calculations and experimental data for all concentrations means that the theory predicts correctly the mean aggregation number and length of both rodlike and wormlike micellar aggregates.

Zwitterionic surfactant solutions. The importance of the dipole component of the interaction free energy, f_{dip} , is illustrated in Fig. 6 in the case of dodecyl (DDAO) and tetradecyl (TDAO) dimethylamine oxide micellar solutions [15]. The solid lines in Fig. 6 represent the results from the developed molecular thermodynamic theory.

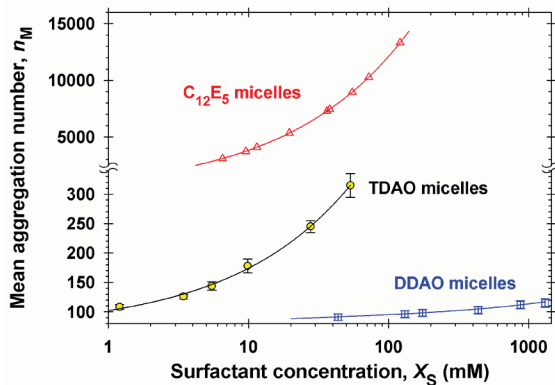


Fig. 6. Comparison of the mean aggregation numbers, n_M , of zwitterionic (DDAO and TDAO) and nonionic ($C_{12}E_5$) micelles.

The molecular dynamics simulations of the structural properties of DDAO and TDAO micelles show that the micelles are generally elongated ellipsoids. It is remarkable that the mean mass aggregation number increases only to 115 with the rise of DDAO concentration up to 1.3 M and to 320 with the rise of TDAO concentration up to 60 mM. The agreement between theory and experiments proves the validity of the theoretical approach not only for giant micelles but also for small micellar aggregates. For comparison, the mean mass aggregation numbers of $C_{12}E_5$ versus surfactant concentration are included in Fig. 6 (see Fig. 3 for E_{sc} of $C_{12}E_5$ at $T = 25^\circ C$). One sees that for

100 mM surfactant concentration, the aggregation number of $C_{12}E_5$ micelles is more than 150 times greater than that of DDAO – both surfactants have identical hydrocarbon tails.

Mixed ionic and zwitterionic surfactants. The thumb rule for practical applications is that the mixtures of zwitterionic and ionic surfactants at a given ratio obey huge synergistic effect – wormlike micelles are formed and the viscosity of the solutions increases orders of magnitude.

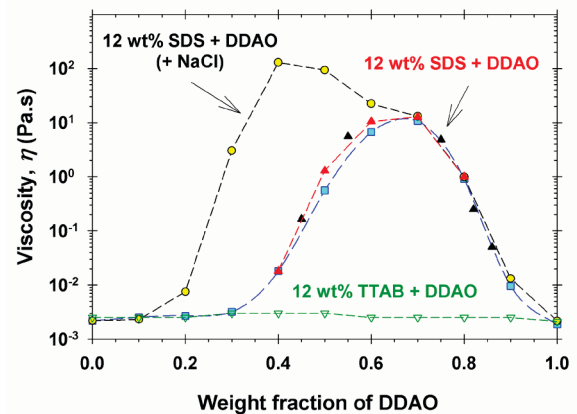


Fig. 7. Viscosity of mixed anionic and zwitterionic surfactant solutions at 12 wt% concentration vs DDAO weight fraction.

Fig. 7 summarizes experimental data for the viscosity of 12 wt% SDS+DDAO mixed solutions measured for different weight fractions of zwitterionic surfactant. The solutions with the individual surfactants are water like. Without added NaCl, the maximum of the viscosity is measured for weight fraction 0.7 and at the maximum, the viscosity increases 5000 times. The presence of NaCl shifts the position of maximum to weight fraction 0.4, where the viscosity increases more than 50000 times. The chemical structures of SDS and DDAO correspond to the electrostatic dipole-charge attraction interactions of the DDAO dipoles (see Fig. 2). In the case of cationic surfactant TTAB, the electrostatic dipole-charge interactions are repulsive (Fig. 2). As a result: the viscosity of TTAB+DDAO mixed solutions is very low (2 mPa.s); it does not depend on the DDAO weight fraction; the micellar aggregates are small for all weight fractions. Hence, for mixed zwitterionic and ionic surfactant solutions, the dipole-charge interaction component of the free energy plays



an important role for the micellar growth and the formation of giant micellar aggregates.

CONCLUSIONS

The molecular thermodynamic theory is a powerful approach for a predictive modeling of the critical micelle concentrations, micelle size and growth of the micellar aggregates in surfactant solutions. From the knowledge of the physicochemical properties of individual molecules and the types of interaction between them, it provides information on the CMC, size and shape of the most probable micellar aggregates for ionic and nonionic surfactants and their mixtures with and without added salt and for zwitterionic surfactants. The present theory can be further extended to describe the synergistic mixing of ionic and zwitterionic surfactants. The obtained results could be of practical interest for development of new formulations and nanostructure materials.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to the project № RG-06-GH 49/5 with the Bulgarian Science Fund for the financial support, and to Project CoE “National center of mechatronics and clean technologies“ BG05M2OP001-1.001-0008 of the Operational Programme “Science and Education for Smart Growth 2014 - 2020” for the used equipment to determine surface tension isotherm and micellar aggregation numbers.

REFERENCES

- [1] Dreiss CA. Wormlike micelles: where do we stand? Recent developments, linear rheology and scattering techniques. *Soft Matter* 2007;3:956–970.
- [2] Georgiev MT, Aleksova LA, Kralchevsky PA, Danov KD. Phase separation of saturated micellar network and its potential applications for nanoemulsification. *Colloids and Surfaces A* 2020;607:125487.
- [3] Bernheim-Groswasser A, Wachtel E, Talmon Y. Micellar growth, network formation, and criticality in aqueous solutions of the nonionic surfactant C₁₂E₅. *Langmuir* 2000;16:4131–4140.
- [4] Parker A, Fieber W. Viscoelasticity of anionic wormlike micelles: Effects of ionic strength and small hydrophobic molecules. *Soft Matter* 2013;9:1203–1213.
- [5] Yavrukova VI, Radulova GM, Danov KD, Kralchevsky PA, Xu H, Ung YW, Petkov JT. Rheology of mixed solutions of sulfonated methyl esters and betaine in relation to the growth of giant micelles and shampoo applications. *Advances in Colloid Interface Science* 2000;275:102062.
- [6] Danov KD, Kralchevsky PA, Stoyanov SD, Cook JL, Stott IP, Pelan EG. Growth of wormlike micelles in nonionic surfactant solutions: Quantitative theory vs experiment. *Advances in Colloid Interface Science* 2018;256:1–22.
- [7] Cates ME, Fielding SM. Rheology of giant micelles. *Advances in Physics* 2006;55:799–879.
- [8] Burov SV, Vorontsov-Velyaminov PN, Piotrovskaya EM. Free energy calculations of spherical and cylindrical micelles using Monte Carlo expanded ensemble method. *Molecular Physics* 2006;104:3675–3679.
- [9] Taddese T, Anderson RL, Bray DJ, Warren PB. Recent advances in particle-based simulation of surfactants. *Current Opinion in Colloid and Interface Science* 2020;48:137–148.
- [10] Nagarajan R, Ruckenstein E. Theory of surfactant self-assembly: A predictive molecular thermodynamic approach. *Langmuir* 1991;7:2934–2969.
- [11] Danov KD, Kralchevsky PA, Stoyanov SD, Cook JL, Stott IP. Analytical modeling of micelle growth. 2. Molecular thermodynamics of mixed aggregates and scission energy of wormlike micelles. *Journal of Colloid and Interface Science* 2019;551:227–241.
- [12] Danov KD, Kralchevsky PA, Stoyanov SD, Cook JL, Stott IP. Analytical modeling of micelle growth. 1. Chain-conformation free energy of binary mixed spherical, wormlike and lamellar micelles. *Journal of Colloid and Interface Science* 2019;547:245–255.
- [13] Danov KD, Kralchevsky PA, Stoyanov SD, Cook JL, Stott IP. Analytical modeling of micelle growth. 3. Electrostatic free energy of ionic wormlike micelles – Effect of activity coefficients and spatially confined electric double layers. *Journal of Colloid and Interface Science* 2021;581:262–275.
- [14] Danov KD, Kralchevsky PA, Stanimirova RD, Stoyanov SD, Cook JL, Stott IP. Analytical modeling of micelle growth. 4. Molecular thermodynamics of wormlike micelles from ionic surfactants: Theory vs experiment. *Journal of Colloid and Interface Science* 2021;584:561–581.
- [15] Danov KD, Marinova KG, Radulova GM, Georgiev MT. Analytical modeling of micelle growth. 5. Molecular thermodynamics of micelles from zwitterionic surfactants. *Journal of Colloid and Interface Science* 2022;627:469–482.



**ПОДОБРЯВАНЕ НА МЕХАНИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА
ЕЛЕКТРОННО-ЛЪЧЕВО ЗАВАРЕНА АЛУМИНИЕВА СПЛАВ
ЧРЕЗ ВЪВЕЖДАНЕ НА ЛЕГИРАЩИ ЕЛЕМЕНТИ
В ЗАВАРЪЧНОТО СЪЕДИНЕНИЕ**

**IMPROVEMENT OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF
ELECTRON-BEAM WELDED ALUMINIUM ALLOY BY INTRODUCING
ALLOYING ELEMENTS INTO THE WELD SEAM**

Maria Ormanova

*Academician Emil Djakov Institute of Electronics – Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria
e-mail: maria.ormanova87@gmail.com*

Stefan Valkov

*Academician Emil Djakov Institute of
Electronics – Bulgarian Academy of Sciences,
Sofia, Bulgaria
Technical University of Gabrovo, Gabrovo,
Bulgaria*

Nikolai Ivanov

*Academician Emil Djakov Institute of
Electronics – Bulgarian Academy of Sciences,
Sofia, Bulgaria*

Darina Kaisheva

*Academician Emil Djakov Institute of
Electronics – Bulgarian Academy of Sciences,
Sofia, Bulgaria*

Angel Anchev

*Technical University of Gabrovo, Gabrovo,
Bulgaria*

Georgi Kotlarski

*Academician Emil Djakov Institute of
Electronics – Bulgarian Academy of Sciences,
Sofia, Bulgaria*

Vladimir Dunchev

*Technical University of Gabrovo, Gabrovo,
Bulgaria*

Dimitar Dechev

*Academician Emil Djakov Institute of
Electronics – Bulgarian Academy of Sciences,
Sofia, Bulgaria*

Borislav Stoyanov

*Technical University of Gabrovo, Gabrovo,
Bulgaria*

Abstract

In this study, we present the results of electron-beam welding of Al6082T6 aluminum alloy with and without deposited Nb layer. The influence of the beam scanning geometry on the structure and mechanical properties of the welded joint was studied. The experiments were realized with different oscillation modes – circle with radius of 0.2 mm and ellipse with semi-axes of 2 and 0.2mm. The phase composition of the obtained welded joints was studied by X-ray diffraction (XRD). The scanning electron microscopy (SEM) was used for investigation of the microstructure of the joints. The chemical composition was investigated by energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX). The mechanical properties were studied by micro-hardness and tensile tests. The results obtained show that the addition of Nb element leads to a significant improvement in the functional properties of the formed weld seam.

Keywords: electron beam welding; Al6082T6 alloy; niobium additive; mechanical properties.



ВЪВЕДЕНИЕ

Формирането на заваръчни съединения между леки материали, като например алуминий и неговите сплави, са от съществено значение за индустрията и са широко използвани в областта на самолетостроенето, автомобилостроенето, корабостроенето и други [1,2]. Въпреки това, техните механични характеристики, като твърдост и якост, биха могли да бъдат подобрени. Съществуват различни техники за преодоляване на тези недостатъци, като един от тях е добавяне на легиращи елементи в заваръчната междина [3].

Концентрираните енергетични потоци (КЕП), такива като електронни, фотонни и йонни снопове, се използват през последните няколко десетилетия [4,5]. Високата плътност на енергия на повърхността на обработваните материали, както и малкият размер на обработената зона, отличават КЕП от конвенционалните топлинни източници. Основно тяхно преимущество е възможността за прецизен контрол на технологичните условия, които от своя страна оказват съществено влияние върху структурата и свойствата на обработваните материали. Поради тази причина КЕП се прилагат при заваряване, повърхнинна модификация, получаване на износ- и корозионоустойчиви твърди покрития и други [6-8].

Методът на електронно-лъчево заваряване (ЕЛЗ) е интензивно използван през последните години поради значителните си преимущества в сравнение с други методи. Сред основните преимущества са висока плътност на мощност, висока скорост на заваряване, позволяваща формирането на много тесни и дълбоки заваръчни шевове, наличието на защитна вакуумна среда и др. При ЕЛЗ се извършва превръщане на кинетичната енергия на електроните в топлина, водещо до рязко нагриване, топене и изпарение на обработвания метал. Формира се паро-газов канал, наречен “keyhole”, състоящ се от прегрята пара в средата,

заобиколена от течен метал [9,10]. В течната вана под действие на различни сили протичат сложни физични и физико-химични процеси [11]. Нагриването и охлаждането на стопения метал в областта на заваръчния шев, както и на метала в зоната на термично влияние се извършва с много големи скорости. В резултат се получават фазови трансформации, които заедно с големите температурни градиенти водят до поява на остатъчни напрежения и деформации.

Авторите на [3] са осъществили изследвания върху възможностите за електронно-лъчево заваряване на алуминиеви сплави /5005, 2024 и 6061/. Получените резултати показват намаляване на твърдостта в зоната на термично влияние, като също така се наблюдава и понижаване на якостта и влошаване на пластичността им. Други автори [12] са приложили осцилация на електронния сноп при заваряване на алуминиеви сплави. Установено е, че прилагането на осцилация на снопа оказва съществено влияние на дълбочината и формата на заваръчния шев. В работа [13] е показана възможност за заваряване на алуминиева сплав 7075 чрез електронен сноп. Резултатите показват наличие на включения от втора фаза, които силно влияят върху структурата и механичните свойства на заваръчния шев. Авторите на [14] са провели изследвания върху електронно-лъчево заваряване на алуминиево-литиева сплав със отложено нанопокритие от мед (Cu). Установили са, че има значително подобряване на експлоатационните свойства на сплавта след добавянето на легиращия елемент.

Важно е да се отбележи, че ефектът от въвеждане на легиращи елементи в заваръчната междина е доста слабо изучен. Ето защо, целта на това изследване е да се изучат възможностите за получаване на заваръчно съединение от алуминиева сплав с отложено покритие от ниобий (Nb) с подобрени механични характеристики.

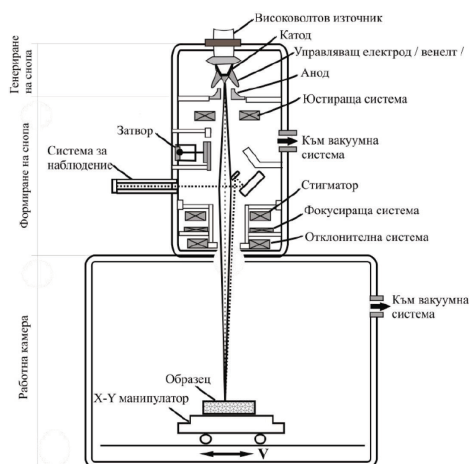


ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ЧАСТ

Образци от алуминиева сплав 6082Т6 с отложено покритие от ниобий върху заваряваните плоскости и имащи размери 100x50x8 mm бяха електронно-лъчево заварени. За сравнение бяха заварени образци без отложени покрития от легиращи елементи върху заваряваните плоскости. Технологичните условия по време на заваръчния процес са следните: ускоряващо напрежение - 60 kV; ток на лъча - 45 mA; честота на сканиране - 200 Hz; скорост на движение на образца - 10 mm/s. По време на процеса бяха приложени две различни геометрии на сканиране – под формата на кръг с радиус 0.2 mm и елипса с полу-оси от 2 и 0.2 mm. Образците са обозначени по следния начин: образец 1 – без слой от ниобий, кръгова геометрия на сканиране; образец 2 – със слой от ниобий, с кръгова геометрия на сканиране; образец 3 – със слой от ниобий, с геометрия на сканиране във вид на елипса.

Принципната схема на машина за електронно-лъчево заваряване е показана на фиг. 1.

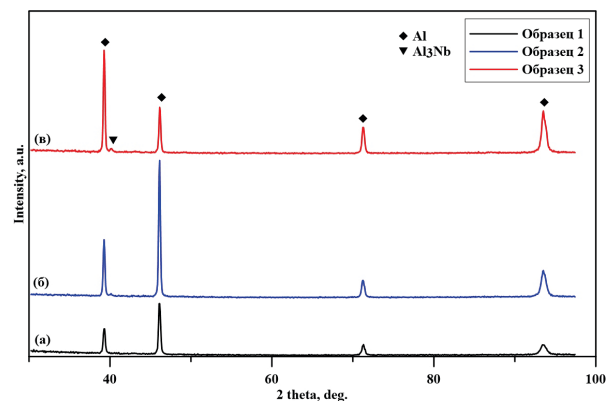
Фазовият състав на получените заварени съединения е изследван чрез методите на рентгеноструктурния анализ. За изследване на микроструктурата на заварките е използвана сканираща електронна микроскопия. Химическият състав е изследван чрез енергийно-дисперсионна рентгенова спектроскопия. Проведени са изследвания за определяне на границите на якост и провлачване.



Фиг. 1 Принципна схема на машина за електронно-лъчево заваряване

РЕЗУЛТАТИ

На фиг. 2 са представени експериментално получените рентгенови дифрактограми на електронно-лъчево заварените образци. Експериментите са реализирани в ъглов диапазон от 30° до 100° в скала 2θ. В случай на образец 1 (без слой от Nb) се наблюдават дифракционни максимуми, които съответстват на фазите на чист Al. При останалите два случая (образец 2 и 3) са регистрирани пикове както на Al, така и на фазата Al₃Nb, което потвърждава успешно въвеждане на легиращия елемент в заваръчната междина. Също така, установено е, че не се наблюдават значителни отмествания на дифракционните максимуми в зависимост от геометрията на сканиране на електронния сноп.

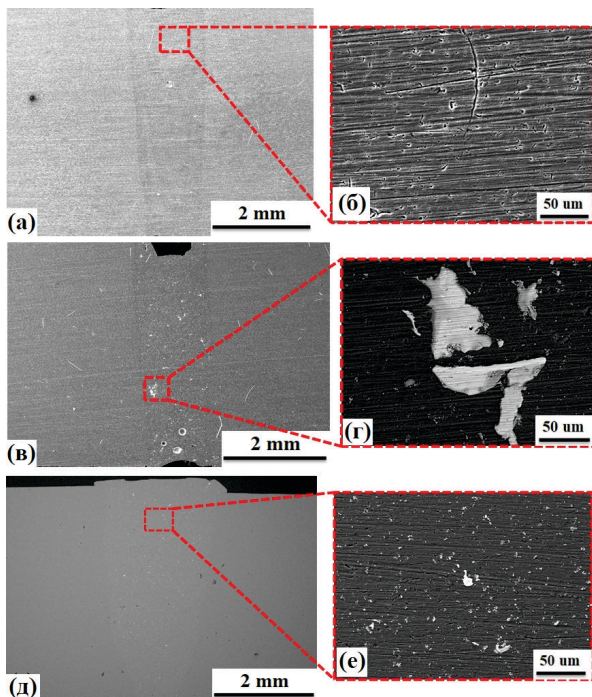


Фиг. 2. Рентгеноструктурен анализ на електронно-лъчево заварените образци

На фиг. 3 са представени СЕМ изображения на напречен срез на трите образца, получени чрез електронно-лъчево заваряване. Фигури 3-а,в,д представляват микроскопски изображения при ниско увеличение, докато фигури 3-б,г,е представляват микроскопски изображения при високо увеличение. Вижда се, че и в трите случая е на лице пълен провар на алуминиевите пластини. Също така, резултатите от микроструктурните изследвания на получените заваръчни съединения, представени на фигури 3-б,г,е ясно показват наличие на



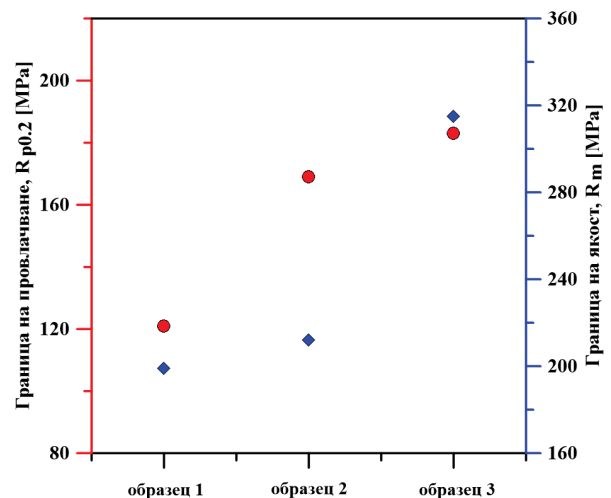
интерметални частици в заваръчния шев, което потвърждава въвеждането на легиращия елемент Nb. Резултатите от енергийно-дисперсионната рентгенова спектроскопия показват съотношение между елементите Al:Nb=68:32, което потвърждава наличието на интерметалната фаза Al_3Nb . Според двойната Al-Nb фазова диаграма, това съотношение съответства на гореспоменатата фаза, което потвърждава резултатите от рентгеноструктурния анализ. Също така, важно е да се отбележи, че в случай на геометрия на заваряване във вид на елипса, структурата на заваръчното съединение е значително по-хомогенна, а интерметалните частици са значително по-фини. Това се отдава на по-дългото времеживее на течната вана, което води до по-добра смесваемост и формиране на по-хомогенна структура.



Фиг. 3. Микроскопски изображения на електронно-лъчево заварени образци: (а) образец 1; (б) образец 2; (в) образец 3.

На фиг. 4 графично са представени резултатите от проведените експерименти по

определяне на границата на якост и границата на провлачване на получените образци. Резултатите показват, че най-ниски стойности за двете механични характеристики са получени при образец 1. Въвеждането на ниобий в заваръчната междина, при образец 2, довежда до повишаване на границата на якост и границата на провлачване. Следователно, добавянето на легиращия елемент води до подобряване на механичните характеристики на заварените образци. Най-високите стойности на границата на провлачване и границата на якост са 180 MPa и 320 MPa, съответно са получени при образец 3. Това означава, че прилагането на геометрия на сканиране във вид на елипса, довежда до получаване на заваръчно съединение с най-добри експлоатационни характеристики.



Фиг. 4. Механични характеристики на електронно-лъчево заварени образци

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В това изследване са представени резултати от електронно-лъчево заваряване на алуминиева сплав 6082T6 с и без отложен слой от ниобий. Изследвано е влиянието на геометрията на сканиране на лъча върху структурата и механичните свойства на заваръчното съединение. Експериментите са реализирани с различни режими на осци-



лация – окръжност с радиус 0.2 mm и елипса с полуоси 2 и 0.2 mm. Получените резултати показват възможност за подобряване на механичните характеристики на електронно-лъчево заварени образци от алуминиева сплав чрез въвеждане на легиращ елемент в заваръчния шев. Установено е, че електронно-лъчевото заваряване при геометрия на сканиране във вид на елипса води най-благоприятните механични свойства на заваръчните съединения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящите изследвания са свързани с изпълнението на задачи по проект BG05M2OP001-1.002-0023 - Център за компетентност „Интелигентни, мехатронни, еко-и енергоспестяващи системи и технологии”.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Malarvizhi, S.; Raghukandan, K.; Viswanathan, N. Effect of post weld aging treatment on tensile properties of electron beam welded AA2219 aluminum alloy. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2008, 37, 294-301.
- [2] Ion, J.C. Laser beam welding of wrought aluminium alloys. Sci.Technol. Weld. Join. 2000, 5, 265-276.
- [3] Cam. G.; Ventzke, V.; Dos Santos, J.F.; Kocak, M.; Jennequin, G.; Gonthier-Maurin, P. Characterisation of electron beam welded aluminium alloys. Sci.Technol. Weld. Join. 1999, 4(5), 317-323.
- [4] Proskurovsky, D.I.; Rotshtein, V.P.; Ozur, G.E.; Markov, A.B.; Nazarov, D.S.; Shulov, V.A.; Ivanov, Yu.F.; Buchheit, R.G. Pulsed electron-beam technology for surface modification of metallic materials. J. Vac. Sci. Technol. A 1998, 16, 2480-2488.
- [5] Petrov, P. Optimization of carbon steel electron-beam hardening. J. Phys.: Conf. Ser. 2010, 223, 012029.
- [6] Petrov, P.; Dimitrov, D.; Aprakova, M.; Valkanov, S. Surface hardening of alloy steels using a high intensity electron beam. Mater. Manuf. Proc. 1998, 13(4), 555-564.
- [7] Zenker, R. Modern thermal electron beam processes – research results and industrial application. La Metallurgia Italiana 2009.
- [8] Ormanova, M.; Petrov, P.; Kovacheva, D. Electron beam surface treatment of tool steels. Vacuum 2017, 135, 7-12.
- [9] З. Шиллер, У. Гайциг, З. Панцер, Электронно-лучевая технология, Москва, изд. Энергия (1980).
- [10] V. Mihailov, V. Karhin, P. Petrov, Fundamentals of welding (In English), Polytechnic University Publishing, St. Petersburg (2016).
- [11] M.St. Weglowski, S. Błacha, A. Phillips, Electron beam welding-Techniques and trends-Review, Vacuum 2016, 130, 72-92.
- [12] Sliva, A.P.; Dragunov, V.K.; Terentyev, E.V.; Goncharov, A.L. EBW of aluminium alloys with application of electron beam oscillation. J. Phys.: Conf. Ser. 2018, 1089, 012005.
- [13] Hayat, F. Electron beam welding of 7075 aluminum alloy: Microstructure and fracture properties. Eng. Sci. Technol. Int. J. 2022, 24, 101093.
- [14] Chen, G.; Yin, Q.; Zhang, G.; Zhang, B. Fusion-diffusion electron beam welding of aluminum-lithium alloy with Cu nano-coating. Mater. Design 2020, 188, 108439.



ОПТИМИЗИРАНЕ НА ТЕМПЕРИРАЩА СИСТЕМА НА ШПРИЦФОРМИ ЗА ИНЖЕКЦИОННО ФОРМОВАНЕ НА ПОЛИМЕРИ

OPTIMIZATION OF THE TEMPERATURE SYSTEM OF SYRINGE MOLDS FOR INJECTION MOLDING OF POLYMERS

Prof. Irina Aleksandrova Ph.D.
Technical University of Gabrovo

Chief. Assist. Hristian Mitev Ph.D.
Technical University of Gabrovo

Assist. Prof. Kalin Anastasov Ph.D.
Technical University of Gabrovo

Abstract

Injection molding of polymers is a highly efficient method of manufacturing plastic products. The quality of the products and the productivity depend to a great extent on the cooling process of the molding elements of the injection mold. For this purpose, a technologically complex system of cooling channels is used. The printing of metal products by the "Direct Metal Laser Sintering" (DMLS) method allows the production of cooling channels without limitation in their shape and cross-section. The article presents an approach for optimizing the tempering system of injection molds for injection molding of polymers, using the "DMLS" method. As a result of modeling the cooling processes, a complex volumetric shape of cooling channels was created, which allow much more efficient cooling. The molding elements were printed on a DMP-200 3D printer and tested. The obtained results show a 40% shortening of the work cycle while preserving the quality of the product..

Keywords: Injection molding; cooling channels; tempering system; 3D printing.

ВЪВЕДЕНИЕ

Инжекционното формоване на полимери е високоефективен метод за производство на изделия. Качеството на изделията и производителността зависят в голяма степен от процеса на temperиране на формообразуващите елементи на шприцформата. За целта се използва технологично сложна система от охлаждащи канали и отвори. Принтирането на метални изделия по метода „Direct Metal Laser Sintering“ (DMLS) позволява изработването на temperиращи системи без ограничение във формата и сечението им. В резултат на моделиране на процесите на охлаждане е създадена сложна обемна форма на охлаждащи канали, които позволяват много по-ефективно temperиране [1,2].

В доклада е представен подход за опти-

мизиране на temperираща система на шприцформи за инжекционно формоване на полимери чрез метода DMLS.

ИЗЛОЖЕНИЕ

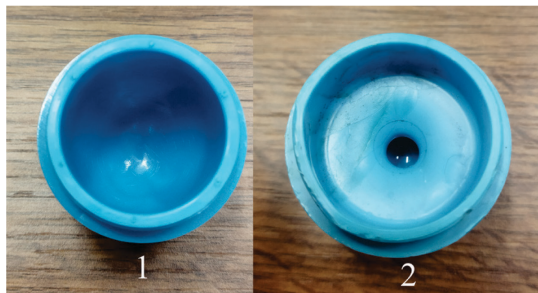
Точността на пластмасовите изделия, изработвани чрез шприцване се колебае в широки граници. Това се дължи на влиянието на голям брой фактори, като главна роля има свиването. То може да бъде разгледано в два аспекта [1,2]:

- Технологично свиване – абсолютно, или относително намаляване на размерите на изделията в сравнение с размерите, получени във формуващата кухня. То започва от момента на запълване на гнездото по време на temperирането и продължава след изваждането на изделието до изравняване на температурата му с тази на околната среда.



- Експлоатационно свиване – абсолютно или относително намаляване на размерите на изделието в сравнение с първоначалните. Причинява се в течение на определено време под въздействието на външни фактори, като температура, влага и т.н.

Разгледан е процес на производство на пластмасов детайл от поликарбонат (PC), при който се наблюдават съществени изменения на първоначалните размери на изделието, получени във формувачата кухина. На фиг. 1. е показан характерен дефект при процес на инжекционно формоване.



Фиг. 1. Детайл без изменения от първоначалните размери (1) и със съществени изменения в резултат на технологично свиване (2)

При производството на детайла е използван комбиниран формовач инструмент „Сърце-дюза“ (фиг. 2), през който се осъществява инжектирането на пластмасовата стопилка. Конструкцията на инструмента е класическа – изработен е чрез използването на конвенционални методи за обработка, което не позволява използването на специални temperиращи системи.



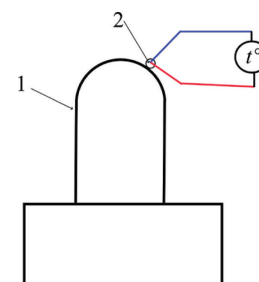
Фиг. 2. Сърце-дюза

Параметрите на процеса на инжекционно формоване са следните:

- Температури на агрегата:
 - $T_1 - 300^{\circ}\text{C}$ – температура на дюзата;
 - $T_2 - 290^{\circ}\text{C}$; $T_3 - 280^{\circ}\text{C}$; $T_4 - 260^{\circ}\text{C}$ – температури, в отделните зони на шнека на агрегата.
- Температура на инструмента – 90°C .
- Време на цикъла – 90 s.

Направени са серия от измервания на температурата на инструмента веднага след изваждане на готовото изделие. Използван е контактен метод за измерване посредством термодвойка, осигуряващ висока точност на отчитане в различни точки от формообразуващата повърхнина на инструмента. Схемата за измерване е представена на фиг. 3.

Измерените стойности на температурата варират в диапазона от 156°C до 160°C , което показва наличието на локални прегрявания на инструмента. Локалните прегрявания в работната зона водят до нарушаване на формата и размерите на готовото изделие.



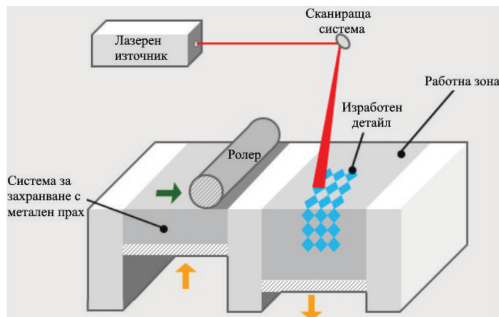
Фиг. 3. Измерване на температурата на формообразуващата повърхнина

Наблюдават се дефекти при произведените детайли, като наличие на всмукнатини и геометрични изкривявания, което налага увеличаване на времето на работния цикъл с цел тяхното предотвратяване.



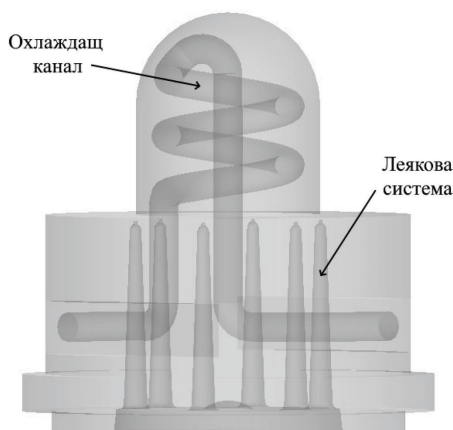
Недостатъците на използваната конструкция от класически тип на формообразуващия инструмент, катко и голямото време на производствения цикъл налагат необходимостта от оптимизиране на начина на temperиране на процеса на инжекционно формование.

Използването на технологията Direct Metal Laser Sintering (фиг. 4.), при която лазерно лъчение стопява метален прах за изработване на метални изделия дава възможност за конструиране на шприц форми с високотехнологични temperиращи системи, съставени от сложни канали и кухни [1].



Фиг. 4. Принцип на работа на DLMS система

В CAD/CAE среда на SIEMENS NX11 е проектирана специална temperираща система от вътрешни охлаждащи канали със сложна геометрична форма. На фиг. 5. е показан 3D модел на комбиниран формообразуващ инструмент „Сърце-дюза“ със специална temperираща система.



Фиг. 5. Детайл „Сърце-дюза“ със специална temperираща система

Проведени са симулации, в резултат на които е избрана пространствената ориентация на temperиращата система в тялото на формообразуващия инструмент „Сърце-дюза“. Резултатите от тях гарантират максимално топлоотвеждане в зоната на формообразуващата повърхнина.

Проектираният детайл „Сърце-дюза“ със специална temperираща система от вътрешни топлопреносни канали е сложен, което определя невъзможността за изработването му чрез използване на класически металообработващи процеси.

Детайлът е изработен чрез 3D принтер за метал ProX DMP200 в лаборатория C1.3. „Аддитивни и енергоспестяващи технологии и екипировка“ на Центъра за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко и енергоспестяващи системи и технологии".

Материалът, от който е изработен, е стомана 1.2709 (инструментална, топлоустойчива стомана), която се използва при производството на шприцформи за пластмасови изделия и цветни метали, като позволява възможност за закаляване до 54 HRC [3]. На фиг. 6. е представен детайл „Сърце-дюза“ със специална temperираща система, изработен на 3D принтер за метал ProX DMP200.



Фиг. 6. Детайл „Сърце-дюза“, изработен на 3D принтер за метал ProX DMP200



Проведени са измервания на температурата на формообразуващата повърнина на изработения формуващ инструмент „Сърце-дюза“. Измерените стойности на температурата варират в диапазона от 108°C до 110°C, което потвърждава резултата от проведените температурни симулации в САЕ среда.

В резултат от понижаването на температурата на инструмента възможността от възникване на промяна на формата и размерите на произведения детайл намалява значително, което води до понижаване на времето на производствения цикъл на детайла с 40%.

На фиг. 7. е представен детайл от РС, произведен чрез инжекционно формование с шприцформа със специална temperираща система.



Фиг. 7. Детайл от РС, произведен чрез инжекционно формование с шприцформа със специална temperираща система

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проектиран е нов формообразуващ комбиниран инструмент „Сърце-дюза“, разполагащ със специална temperираща система от вътрешни охладителни канали. При проектирането му са проведени симулации на процеса на инжекционно формование и е избрана оптимална геометрична конфигурация на temperиращата система.

В резултат на проведената оптимизация значително е намалена възможността от поява на всмукнатини и други дефекти на изработените пластмасови изделия, като производителността е увеличена с 40% за сметка на намаленото време на технологичния цикъл.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Събев П. Пластмасови изделия и шприцформи. Хайкад Инфотех, Пловдив, 2017.
- [2] Fristche C, Fristche H, Kolbinger J. Fachkunde Kunststofftechnik Lernfelder 1 bis 14. Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten, 2010.
- [3] https://support.3dsystems.com/s/article/materials-dmp-materials?language=en_US.



ТЕКСТИЛНИТЕ ОТПАДЪЦИ – ИКОНОМИЧЕСКА И ЕКОЛОГИЧНА ЦЕЛЕСЪОБРАЗНОСТ

TEXTILE WASTE – ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL FEASIBILITY

Svetla Boyanova Panayotova, Ivanka Weleva Stoyanova-Todorova

*Department of Social and Economic Sciences
Technical University of Gabrovo
4 Hadji Dimiter str., 5300 Gabrovo, Bulgaria
e-mail: svetla7561@abv.bg vantod61@abv.bg*

Abstract

Currently, in a global aspect, the secondary raw materials contained in textile waste are emerging with increasing importance both for the economy and also for the ecology. By using high-tech processes, textile waste, instead of ending up in landfills for incineration, can be processed into new products. The purpose of this report is to present the economic and environmental feasibility of textile waste. The thesis of the authors is that the reduction of textile waste is an opportunity for their participation in the "circular economy" business model when applying different technological processes. To achieve the formulated goal, the authors of the present work used the research methods: survey, comparison, analysis, summary.

Keywords: textile waste, economic, environmental, feasibility.

ВЪВЕДЕНИЕ

В съвременните условия наличието на огромни количества отпадъци от текстил се явява съществена предпоставка за тяхното оползотворяване. Понастоящем, в глобален аспект, вторичните суровини, които се съдържат в текстилните отпадъци, се очертават с все по-голямо значение както за икономиката, така също и за екологията. През месец март 2022 г. Европейската комисия прие Стратегия за устойчиви и кръгови текстилни изделия. Приложението на Стратегията предвижда до 2030 г. значително намаляване на вредното въздействие на модната индустрия върху околната среда. [1]

Като се използват високотехнологични процеси текстилните отпадъци, вместо да попадат в депата за изгаряне, могат да се преработват в нови продукти. По този начин се удължава жизнения цикъл на тек-

стилните продукти, като се допринася и за устойчивост на околната среда.

Целта на настоящия доклад е да представи икономическата и екологична целесъобразност от текстилните отпадъци.

Тезата на авторите е, че текстилните отпадъци могат да участват в бизнес-модела „кръгова икономика“ при прилагане на различни технологични процеси.

За постигане на формулираната цел авторите на настоящата разработка са използвали **изследователските методи**: проучване, сравнение, анализ, обобщение.

Представено е сравнение на бизнес-моделите. Извършен е анализ на икономическите и екологични ефекти от текстилните отпадъци. Проследена е зависимостта между процесите „recycling“, „downcycling“, „upcycling“. Разкрити са тенденциите при текстилните отпадъци за участието им в „кръговата икономика“.



Ограничението в изследването се отнася само до текстилни отпадъци от естествени суровини, без да се подценява значението и на текстилните отпадъци от синтетични суровини.

В резултат от направеното изследване авторите очакват да се постигне по-голяма информираност на обществеността относно икономическата и екологична целесъобразност от текстилните отпадъци и да се увеличи отговорността на потребителите при събиране и оползотворяване на текстилните отпадъци.

ИЗЛОЖЕНИЕ

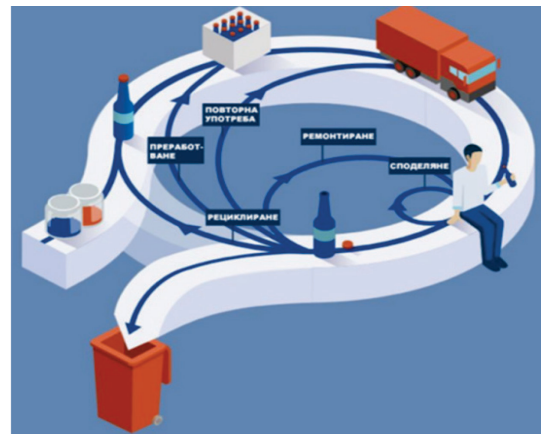
1. Сравнение на бизнес-моделите

1.1. Бизнес-модел „кръгова икономика“

Бизнес-моделът „кръгова икономика“ (circular economy) предвижда при етапите на производство и потребление на продуктите да не се генерират загуби на суровини и материали. Европейската комисия, в пътната карта за ефективно използване на ресурсите, формулира като приоритет развитието на кръговата икономика. В Плана за действие „зелена сделка“ (Green Deal) за кръгова икономика от март 2020 г. на Европейската комисия са включени 35 законодателни и незаконодателни мерки в рамките на 3 годишен период. Формулирани са следните насоки: дизайн на продуктите, устойчиво потребление, зелени обществени поръчки, износ на отпадъци и вторична употреба на материали.

При сравняване на бизнес-моделите „линейна икономика“ и „кръгова икономика“ се установява, че бизнес-моделът „вземи-произведи-използвай-изхвърли“ генерира огромни количества отпадъци, които често попадат в депата. При „кръговата икономика“ стремежът е да се намали количеството отпадъци, дори в някои сектори на промишлеността да се достигне до нулеви отпадъци.

За настоящото изследване е необходимо да се изтъкне фактът, че за разлика от бизнес-модела „линейна икономика“ при бизнес-модела „кръгова икономика“ икономиката и екологията не се явяват конкуренти помежду си. Пример за продукт при бизнес-модел на „кръгова икономика“ е представен на фигура 1.



Източник: [2]

Фиг. 1. Продукт при кръгова икономика

Когато се сравняват бизнес-моделите „линейна и кръгова икономика“ е необходимо да се подчертае, че тези модели в съдържателно отношение са с противоположни концепции. Те се проявяват и с различни икономически и екологични ефекти относно потреблението на ресурси и замърсяването на околната среда. При бизнес-модела „кръгова икономика“ управлението на отпадъците е основополагаща и споделена ценност.

1.2. Икономически ефект от текстилните отпадъци

В съвременните пазарни условия многообразието от текстилни продукти и краткият им жизнен цикъл водят до натрупването на огромни количества от текстилни отпадъци.

В зависимост от произхода си всички текстилни влакна се разделят на две групи:

- естествени текстилни влакна;
- химични текстилни влакна.



За настоящата разработка авторите изследват само текстилните продукти от естествени влакна. В таблица 1 са посочени видовете естествени текстилни влакна.

Таблица 1: Видове естествени текстилни влакна

Текстилни влакна	Произход	Видове	Представители
Естествени	растителен	семенни	памук
		ликови	лен, коноп, юта, сизал, бамбук
		плодови	кокосово влакно
	животински	покривни	вълна, козина
		секреторни	естествена коприна
	минерален	азбестови	амфибол, серпентин

Съгласно проведен анализ „Текстилните изделия се нареждат на четвърто място сред категориите, оказващи най-голям натиск върху използването на първични суровини и вода (след храните, жилищното строителство и транспорта), и на пето място по емисии на парникови газове.“ [3]

От данни на Европейската комисия се установява, че ежегодно в страните от Европейския съюз се отстраняват 5,8 мил. t текстил. Около 25% от тях (1,5 мил. t текстил) подлежат на рециклиране от благотворителни организации и индустриални предприятия. Остатъкът от 4,5 мил. t текстил попада окончателно в депата или като отпадък се изгаря в градските съоръжения. В таблица 2 са представени данни относно текстилните отпадъци спрямо произхода им в Европейския съюз в % изражение. Както може да се установи от посочените данни в таблица 2 с най-голям % - 71% са текстилните отпадъци от домакинството и

мебелите (49%) и от стари дрехи и други текстилни отпадъци (22%).

Таблица 2: Текстилни отпадъци в Европейския съюз

Текстилни отпадъци в зависимост от произхода им	% изражение
Домакинство и мебели	49
Стари дрехи и други текстилни отпадъци	22
Строителни отпадъци и разрушени сгради	16
Производство	11
Стари автомобили	2
Общо:	100

Забележка: адаптирана по източник [4]

Авторите на настоящата разработка изтъкват и фактът, че 40-50% от текстилните отпадъци се продават в магазините за втора употреба; 25-30% от тях се използват като средства за почистване; 20-30% се влагат като вторични суровини при производството от други сектори на промишлеността.

1.3. Екологичен ефект от текстилните отпадъци

Съгласно Европейска директива всички държави-членки на Европейския съюз трябва да въведат задължително разделно събиране на текстилните отпадъци от 1-ви януари 2025 година.

Целите на държавите-членки на Европейския съюз, които трябва да се постигнат по отношение на разделното събиране и повторното оползотворяване на битовите отпадъци са илюстрирани в таблица 3.

Таблица 3: Цели на Европейския съюз до 2035 година

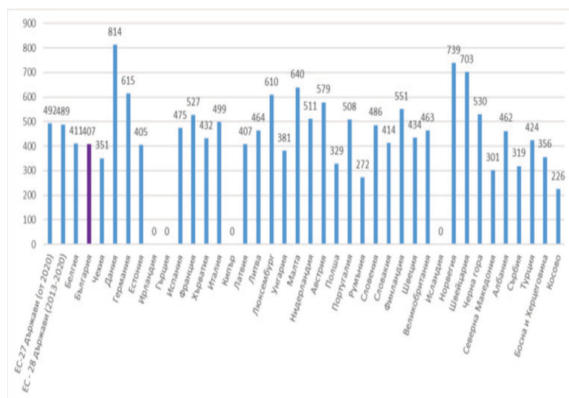
	до 2025 г.	до 2030 г.	до 2035 г.
Битови отпадъци	55%	60%	65%

Забележка: адаптирана по източник [5]

За настоящото изследване трябва да се отбележи, че голяма част от битовите



отпадъци се генерира от домакинствата – около 90%, докато останалите 10% са резултат от дейностите на търговски, административни, социални, фирмени и други обекти. На фигура 2 са представени данни за битовите отпадъци в Република България и други държави-членки на Европейския съюз за 2018 година.



Източник: [6]

Фиг. 2. Битови отпадъци в Република България и други европейски страни за 2018 г. (kg/жител/година)

От представените данни на фигура 2 се установява, че на глава от населението в Република България се падат по 407 kg битови отпадъци. Значителни са разликите в другите държави-членки на ЕС, като нормата на натрупване на битови отпадъци варира от 226 kg в Косово до 814 kg в Дания и 729 kg в Норвегия. [6]

В Република България, съгласно чл. 13 (1) от Закона за управление на отпадъците е забранено изхвърлянето на подобен род отпадъци в депата за общ битов отпадък: „Изискванията към продуктите, след чиято употреба се образуват масово разпространени отпадъци, редът и начините за тяхното разделно събиране, повторна употреба, рециклиране и/или оползотворяване, ... [7]

Делът на текстилните отпадъци, които се изхвърлят в Република България представлява 5.4% от всички битови отпадъци. Освен натрупването на големи количества

текстилни отпадъци, те оказват и негативно въздействие върху околната среда. Според авторката Т. Ремова „Потреблението на текстил е третата област с най-висока консумация на вода и земя и е на пето място по отношение на използването на първични суровини“. [8]

Climate Works Foundation и консултантската организация Quantis, в доклада си посочват, че „индустриите за дрехи и обувки заедно допринасят за 8% от глобалните парникови емисии“ [9]

2. Зависимост между процесите „recycling“, „downcycling“, „upcycling“

2.1. Рециклиране

Все още в специализираната литература няма еднозначно мнение относно процеса по рециклиране на текстилни отпадъци. Съществуват аргументи, че посредством процеса по рециклиране на текстилни отпадъци може да се постигне затворен цикъл (кръгова икономика).

Процесът по рециклиране на текстилни отпадъци допринася и за опазване на околната среда. Постоянно нараства броят на фирмите, които още от началото на 90-те години прилагат процес по рециклиране на текстилни отпадъци (H&M, Zara и др.). Поради този факт текстилните отпадъчни материали не трябва да попадат в боклука, а след това и в депата.

Резултатите от проведени проучвания за оползотворяването на текстилни материали сочат, че:

- 35% се преработват за почистващи кърпи в индустрията;
- 24% се използват за получаването на текстилни влакна;
- 6% остават като отпадък. [10]

Икономическата целесъобразност от процеса по рециклиране на текстилни отпадъци се отнася и до приложението им в други сектори на икономиката:

- получаване на прежда;
- повторно производство на влакна;



- звуко-, топлоизолационни материали за строителството;
- амортизационни материали;
- материали за пътното строителство;
- тапицерски материали за коли;
- техническа памучна вата, матраци, седалки и др.

Ползите от процеса по рециклиране на текстилни отпадъци се отнасят и до екологичната целесъобразност:

- икономия на енергия;
- по-малко отпадъчни води;
- отпада повторното боядисване на рециклираните материали;
- намаляват вредните емисии от CO₂;
- рециклираното вълнено влакно не се нуждае от измиване с големи обеми вода.

2.2. Downcycling

При текстилните отпадъци се използва и процеса „downcycling“. Чрез него отново се произвеждат текстилни продукти, но те са със занижена стойност. Получените нови продукти не могат повече да заместят качеството на първоначалните продукти.

При преработката на стари, износени или скъсани дрехи не е възможно да се получат нови дрехи. Алтернативи за повторното им оползотворяване са преработените текстилни суровини и материали да служат за пълнеж или като кърпи за почистване в други сектори на икономиката.

Процесът downcycling допринася и за опазване на околната среда. Той елиминира отпадъците и съдейства да се произведат нови продукти от стари текстилни материали, които в противен случай биха се озовали на депото.

В процеса на приложение на downcycling се предлагат следните предимства:

- икономия на разходи за енергия;
- намалява замърсяването;
- редуцират се производствените разходи;
- опазва се околната среда.

2.3. Upcycling

Алтернатива на рециклирането на текстилни отпадъци може да бъде и процесът „upcycling“. При този процес от текстилните отпадъци се получават нови текстилни продукти с по-висока стойност.

Като се използва upcycling процеса при текстилните отпадъци се предотвратява разхищаването на потенциално полезни материали посредством съществуващите такива. В резултат се намалява и потреблението на изходящи суровини (енергия, замърсяване на въздуха, водата, емисии на парникови газове) за производството на нови продукти.

За сравнение с процеса по рециклиране на текстилни отпадъци при upcycling процеса „най-голямото предимство е, че няма разходи и може да се прилага и за създаване на креативни дизайнерски продукти“.

[11]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В резултат от проведеното изследване и представените икономическа и екологична целесъобразност от текстилните отпадъци авторите предлагат и някои тенденции при текстилните отпадъци, които могат да намерят място в бизнес-модела „кръгова икономика“:

- Концепцията „Cradle-to-Cradle“ – „от люлката до люлката“ се отнася до идеята за затворени цикли. „Тя засяга не само вложените материали при производството на продукти, но и след употребата на продуктите“.[12] При тази концепция съществуват две категории продукти, които могат да бъдат използвани: консумативи в биологични цикли; рециклирани като стоки в технологични цикли. Концепцията „Cradle-to-Cradle“ се явява принос на икономиката към устойчивото развитие.



- **Бавна мода** – тази тенденция се противопоставя на бързата мода, като цени разнообразието; насърчава социално-екологичното съзнание у потребителите; допринася за доверието между производители и потребители.
- **Честна търговия** – явява се алтернатива на традиционните форми на пазара; стреми се към по-справедливи стандарти на поведение; гарантира, че закупените продукти се произвеждат по съзнателен, хуманен и отговорен начин.
- **Мода с нулеви отпадъци** – тенденцията се отнася до производството на облекло и аксесоари, което генерира малко или никакви отпадъци. В този модел, в допълнение към повторното използване на остатъците за изработване на детайли на дрехите, дизайнерът избира модели, които ефективно използват тъканта, създавайки устойчива дреха от началото до края на производствения процес.

По отношение на някои от посочените по-горе тенденции съществуват вече публикации, но други тенденции предстоят да бъдат обект на бъдещи изследвания.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ЕК слага край на бързата мода и модела "вземам, чупя, хвърлям", <https://www.mediapool.bg/ek-slaga-krai-na-barzata-moda-i-modela-vzemam-chupya-hvarlyam-news334313.html>, 7.04.2022.
- [2] Ангелов, Б., Фактите за: Зеления пакт и кръговата икономика, публикуван 23.8.2021, изтеглен 14.5.2022, https://www.clubz.bg/117446-faktite_za_zeleniya_pakt_i_krakovata_ikonomika
- [3] Нов план за действие относно кръговата икономика. За по-чиста и по-конкурентоспособна Европа, Брюксел, публикуван 11.3.2020, изтеглен 14.5.2022, https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0012.02/DOC_1&format=PDF
- [4] GLOBAL 2000 & Friends of the Earth Europe, Weniger ist mehr, https://www.global2000.at/sites/global/files/Recyclingreport_DE_0.pdf, 2013, S. 15-20
- [5] Българско председателство на Съвета на Европейския съюз, Управление и рециклиране на отпадъците: Съветът приема нови правила, 22.5.2018. <https://eu2018bg.bg/bg/news/1107>
- [6] Министерство на околната среда и водите, 2021, Анализ на състоянието на отпадъците, <https://www.moew.government.bg/static/media/ups/tiny/%D0%A3%D0%9E%D0%9E%D0%9F/%D0%9D%D0%9F%D0%A3%D0%9E-2021-2028/1.1%20Analiz%20otpadatsi%2008%2006%202021.pdf>
- [7] Закон за управление на отпадъците, ДВ. бр. 53/13.07.2012.
- [8] Ремова, Т., Бърза мода: дрехи, проектирани да издържат 30 пранета, <https://move.bg/fast-fashion>, 28.02.2020
- [9] Тошкова, В., Индустрията за бърза мода налага все по-спешни за решаване екологични проблеми, <https://www.investor.bg/a/355-zoom/257044-industriyata-za-barza-modanalaga-vse-po-speshni-za-reshavane-ekologichni-problemi>, 7.3.18 г.
- [10] Asan Textilrecycling GmbH, Recycling schont die Umwelt, <https://asan-textilrecycling.de/unser-service.html>
- [11] Panayotova, S., Madzharova, S., Ivanova, P., Waste – An opportunity for the circular economy, Научна конференция TechCo – Ловеч 2020 сборник доклади, УИ „В. Априлов“, Габрово, сс. 175-180.
- [12] Panayotova, S., Gemeinhardt, J., Cradle-to-Cradle - Concept for Non-Waste Products, International Scientific Conference “UNITECH’19”- Gabrovo Proceedings, Vol.3, University Publishing House “V. Aprilov”, Gabrovo, pp. 43-47.



ВЛИЯНИЕ НА ГЕОМЕТРИЧНИТЕ ПАРАМЕТРИ И ОГРАНИЧЕНИЯ ВЪРХУ КОЛЕКТИВНОТО ПОВЕДЕНИЕ НА ФОРМАЦИЯ ОТ АВТОНОМНИ РОБОТИ

IMPACT OF GEOMETRIC TE PARAMETERS AND CONSTRAINTS ON THE COLLECTIVE BEHAVIOR OF AUTONOMOUS ROBOTS FORMATION

Vanya Markova

Ventseslav Shopov

*Institute of Robotics – Bulgarian Academy of Science
markovavanya@yahoo.com*

Abstract

This paper investigates consensus protocol issues among a collective of autonomous mobile wheeled robots. Consensus protocol is presented as a joint distributed policy for pursuing common goals in a formation. Two cases of a leader-follower system and of an equal deliberative collective of autonomous mobile wheeled robots are considered. Simulations are made in two-dimensional space that show the influence of basic parameters such as geometric distances and angles on the overall performance.

Keywords: Consensus protocol, autonomous mobile robots, collective robotics..

ВЪВЕДЕНИЕ

През последните години въпросите свързани с на управлението на разпределени динамични системи привлече вниманието на учените в теорията на много-агентните системи [3], [9], [11], [14]. Това е важен проблем при координацията и взаимодействието на агентите [15].

Консенсусът на работния екип може да се опише като начин за намиране на баланс между две противоположни концепции: съгласие и специализация [2], [12]. Съгласието може да се определи като еднозначно съгласуване на общите цели, докато специализация е разпределението на конкретни индивидуални задачи задачи за всеки от роботите в екипа[4], [7].

Консенсусът от своя страна е важен за превръщането на екипа от работа в ефективна система. Следователно трябва да се

постигне споразумение между роботите, както при колективното съгласуване на цели, така и при разпределението на специализирани дейности за достигането на тези цели[1], [8].

С подходящи алгоритми за колективно вземане на решения екипът може да решава задачи, така все едно че е един робот, въпреки че по същество целта се постига от разпределен екип от агенти[10]. В обобщение, основната цел на базираните на консенсус протоколи е да се създаде достъпно споразумение за контрол, така че група роботи да се сближат с цел от общ интерес. Така че контролният вход се нарича консенсусен протокол, а постоянната цел, която зависи от първоначалното състояние, се нарича консенсусно състояние. През последните години бяха публикувани няколко изключително подробни прегледа



на различните подходи за прилагане на консенсус [5], [6], [13].

В тази работа ние експериментално изследваме две хипотези: първата хипотеза е, че дори без лидер, използвайки теорията на графите, екип от роботи може да постигне консенсус за крайно време. И втората хипотеза е, че времето на конвергенция не зависи от броя на агентите, а зависи от отклонението на най-отдалечения агент в началния момент от времето.

Документът е организиран по следния начин: във втората част даваме кратка теоретична основа, в третата част описваме експериментите и обсъждаме резултатите, а в четвъртата част даваме някои заключения.

МЕТОДИ И АЛГОРИТМИ

Кинематичен и динамичен модел на колесен подвижен робот

Кинематичният модел на робота е:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 \\ \sin \phi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

Където x и y са координатите на геометричния център на робота. Ъгълът ϕ е ъгълът между оста на глобалната координатна система и страничната ос на робота. V е скоростта на робота, а ω ъгловата скорост.

Нехолономното ограничение на движението е:

$$\begin{aligned} \dot{y} \cos \phi &= 0 \\ -\dot{x} \sin \phi &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Полученият динамичен модел, записан в матрична форма, е:

$$\begin{aligned} F(\dot{q}) &= E(q)u - A^T(q)\lambda \\ M(q)\dot{q} &+ V(q, \dot{q}) \end{aligned} \quad (3)$$

Където q е вектор на позицията и ъгъла, u е управляващ входен вектор, M е инерционната матрица и V е матрицата на управление.

Обобщеният модел може да се запише като:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \\ \dot{u} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \cos \phi \\ u \sin \phi \\ \omega \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{mr} & \frac{1}{mr} \\ \frac{L}{2Jr} & -\frac{L}{2Jr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix} \quad (4)$$

Моделът на системата за обработка се получава, като се вземат предвид:

$$\begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{u} \frac{mr}{2} + \dot{\omega} \frac{Jr}{L} \\ \dot{u} \frac{mr}{2} - \dot{\omega} \frac{Jr}{L} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Теория на графите и консенсусен подход

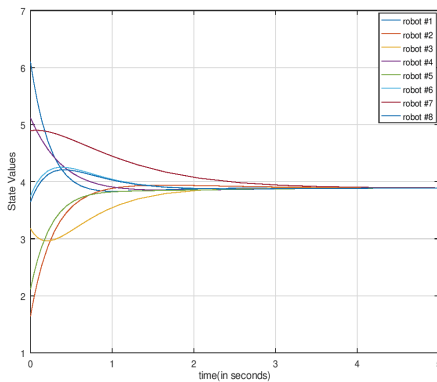
Формацията на автономни колесни мобилни роботи (Wheeled Mobile Robots - WMR) може да бъде представено като граф $G = (V, E)$. В този граф имаме двойка набори от възли и ребра, които ги свързват. По този начин казваме, че сме задали V от N възли или върха и задали E от M ребра или дъги. Дъгите на E се определят като двойка възли (v_i, v_j) .

Графът G , използван в нашето изследване, е ненасочен, така че потокът от информация или данни може да тече и в двете посоки. Освен това представяме колектива на агента като прост граф: т.е. не съществува възел, който е едновременно начало и край на ребро и в тази графика няма две ребра с еднакви начални и крайни възли. Всички възли, които имат общ ръб с възел v_i , образуват множеството от съседи на възела.



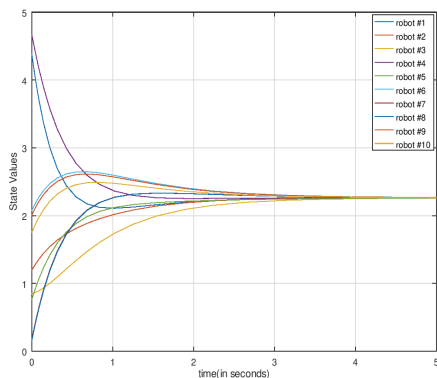
ЕКСПЕРИМЕНТИ И РЕЗУЛТАТИ

Имаме група роботи, които трябва да разработят обща политика. Роботите трябва да изберат ъгъл на ориентация в пространството, който да следват. Всички роботи трябва да постигнат консенсус относно ъгъла на движение на екипа. След това те трябва да започнат да се движат в обща посока. Имаме група нехолономни роботи, които трябва да заемат позиция от началната позиция и да се прицелят под общ ъгъл.

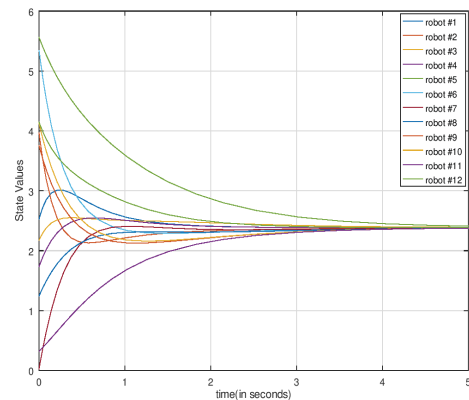


Фиг. 1. Движение на осем WMR в равнината X-Y

В първия експеримент имаме осем работа, които трябва да се движат в обща посока. Няма недвусмислено определен лидер, както няма и конкретно посочено състояние, в което роботите ще се окажат в края на изпълнението.



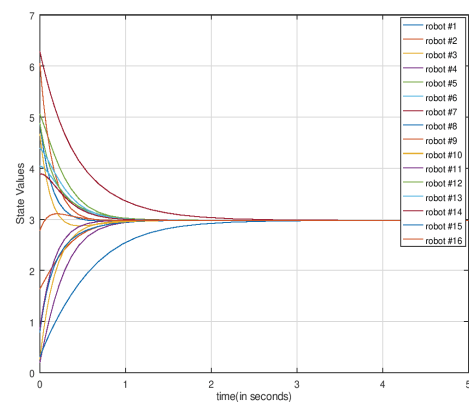
Фиг. 2. Движение на десет WMR в равнината X-Y



Фиг. 3. Движение на дванадесет WMR в равнината X-Y

Издигаме следната хипотеза: роботите могат да постигнат консенсус за ограничено време. Освен това твърдим, че не е необходимо да има лидер за постигане на поставените цели. Критерият за доказване или отхвърляне на хипотезата е следният: всички компании трябва да са в едно състояние, което се описва от ъгъла на движение на формацията.

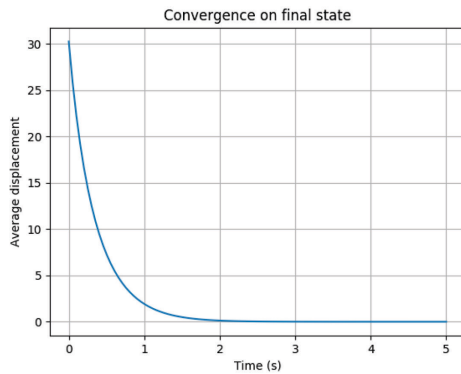
Всички роботи са от един тип и имат еднакви параметри. Параметрите на робота са маса $m = 0,75$ kg, инерционен момент $J = 0,001$ kgm², дължина $L = 0,075$ m, радиус на колелото $r = 0,024$ m и междуосие $d = 0,01$ m.



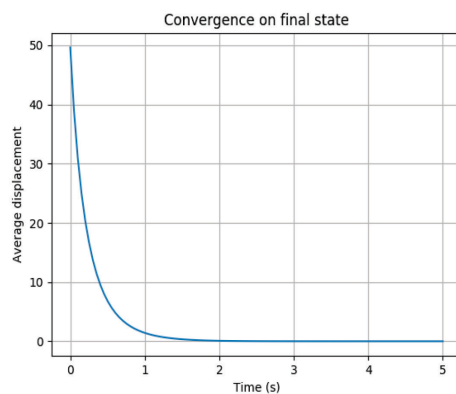
Фиг. 4. Движение на шестнадесет WMR в равнината X-Y



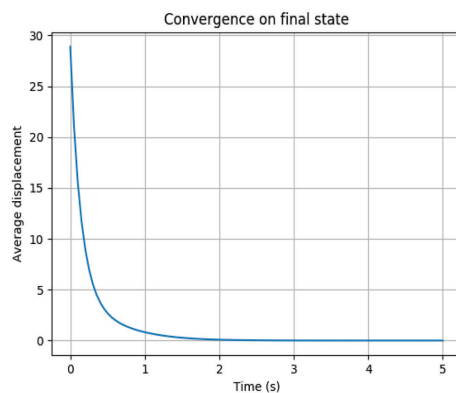
Фигури 1, 2, 3 и 4 показват, че роботите постигат консенсус за по-малко от 5 секунди. Тук ясно се вижда, че първата хипотеза не може да бъде отхвърлена.



Фиг. 5. Времева конвергенция на шест WMR



Фиг. 6. Конвергенция във времето на десет WMR



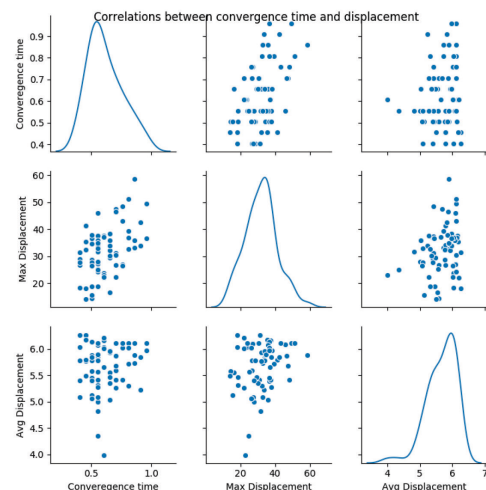
Фиг. 7. Времева конвергенция на шестнадесет WMR

Фигури 5, 6 и 7 показват, че роботите постигат консенсус за по-малко от 4 секунди. Тук ясно се вижда, че няма връзка между броя на роботите и времето за конвергенция.

Все още обаче остава въпросът: от какво зависи времето на конвергенция? Тук приемаме, че времето за конвергенция може да зависи от две неща: или пълното отклонение от крайното състояние в началния момент от времето, или отклонението на агента, който е най-отдалечен от крайното състояние.

Ние наричаме "Максимално изместване" или "Максимално изместване" разстоянието от крайното състояние на най-отдалечения агент в началото. За всяка стъпка на симулация (поне десет пъти в секунда), тази стойност се изчислява и запазва за понататъшен анализ.

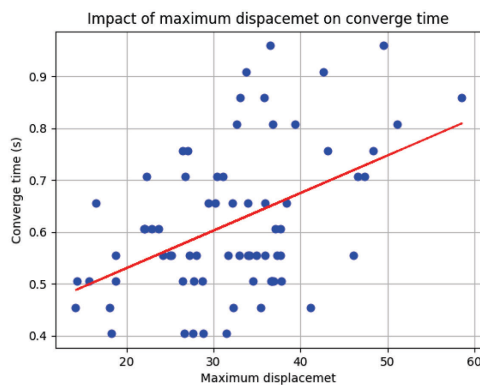
Ние определяме "Средно изместване" или "Средно изместване" като средното отклонение за агентите от крайното състояние. тази стойност също се изчислява и запазва за допълнителен анализ при всяка стъпка на симулация.



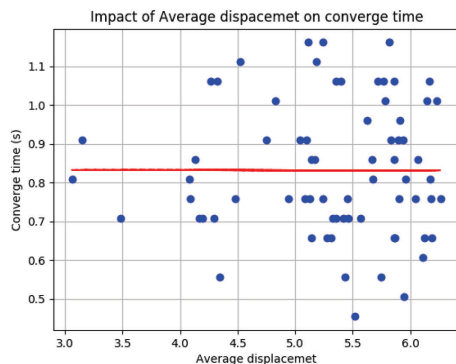
Фиг. 8. Шестнадесет WMRs: корелация между времето на конвергенция и средното и максимално изместване



Тук има един подводен камък: ние не знаем точната стойност на крайното състояние в началния момент от времето. Освен това ние не знаем тази стойност дори по време на симулацията. От това следва, че не можем да правим *ad hoc* анализ. Всичко, което ни остава да направим, е апостериоритен анализ.



Фиг. 9. Шестнадесет WMR: Влияние на максималното изместване върху времето за конвергенция



Фиг. 10. Шестнадесет WMR: Влияние на средното изместване върху времето за конвергенция

За да направим това, трябва да направим цялата симулация и да получим точната стойност на крайното състояние на отбора. И едва след като симулацията приключи, можем да изчислим реалния размер на отклоненията. Записваме тези стойно-

сти в променливата "Средно разстояние" и също така изчисляваме максималното отклонение от крайното състояние в същия интервал и записваме тези стойности в променливата "Максимално изместване". След това изграждаме корелация между времето на конвергенция и дислокация.

Фигура 8 показва, че има корелация между времето на конвергенция и "Максималната дислокация". Освен това разпределението на двете променливи е близко до нормалното. Така че можем да направим изводи за връзката между тези променливи.

Така че виждаме, че има връзка между времето на конвергенция и "Максималната дислокация". Следователно можем да конструираме линейна (или по-сложна) регресия. Фигура 9 показва, че има зависимост от максималното време на дислокация и конвергенция. Фигура 10 показва, че няма текуща връзка между "Средно изместване" и времето за конвергенция.

Всички работи стартират в произволни позиции в интервал от -10 до +10 метра и максимална скорост от 5 метра в секунда. Ъгълът към основната ос е произволен от 0 до 360 градуса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В тази статия изучаваме приложението на консенсусния подход в областта на колективната роботика. Изследвано е постигането на консенсус за група разпределени работи без лидер. Резултатите от експериментите показват, че роботите могат да бъдат приведени в едно състояние за краен период от време.

Също така можем да направим следните изводи: времето за конвергенция не зависи от броя на агентите. Това следва от факта, че агентите вземат решения независимо. В допълнение, времето за конвергенция не зависи от средната дислокация в първоначалното състояние. В по-голяма степен



времето на конвергенция зависи от размера на дислокацията на агента, който е най-отдалечен в началния момент от времето на крайното състояние на агентите.

В този случай възниква дискуссионен момент за бъдещи изследвания: трябва ли агентният колектив да продължи да се движи с очакването, че „изоставащият“ агент ще настигне колектива и евентуално ще заеме мястото му във формацията по-късно. Или всички да спрат да се движат и да изчакат „изоставащият“ робот да застане на място и едва когато всички роботи се заемат във формация, да продължат да се движат.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Alouache A., Q. Wu, Performance comparison of consensus protocol and l - ϕ approach for formation control of multiple nonholonomic wheeled mobile robots. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, 2017, 8(1), pp.22-32.].
- [2] Brambilla M., E. Ferrante, M. Birattari, and M. Dorigo. “Swarm robotics: a review from the swarm engineering perspective”. *Swarm Intelligence*, 7(1), 2013, pp. 1–41.
- [3] Jabdabaie A., J. Lin, A.S. Morse,: ‘Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules’, *IEEE Trans. Autom.Control*, 2003,48, (6), pp. 988–1001
- [4] Khan S., I. Hussain, M.I. Khattak, Consensus Based Formation Control of Multiple UAVs. *Journal of Information Communication Technologies and Robotic Applications*, 2020, pp.31-37]
- [5] Liu G.P., , S. Zhang. A survey on formation control of small satellites. *Proceedings of the IEEE*, 2018, 106(3), pp.440-457.
- [6] . Liu Y, R. Bucknall, A survey of formation

control and motion planning of multiple unmanned vehicles. *Robotica*. 2018;36(7):1019-47.

- [7] Maghenem M. A., A. Loria, E. Nuno, E. Panteley, . Consensus-based formation control of networked nonholonomic vehicles with delayed communications. *IEEE Transactions on Automatic Control* 2020.
- [8] . Montes de Oca M. A, Eliseo Ferrante, Alexander Scheidler, Carlo Pinciroli, Mauro Birattari, and Marco Dorigo. Majority-rule opinion dynamics with differential latency: a mechanism for self-organized collective decision-making. *Swarm Intelligence*, 5(3-4): 2011, pp. 305–327.
- [9] Olfati-Saber R., R.M. Murray: ‘Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays’, *IEEE Trans. Autom.Control*, 2004, 49, (9), pp. 1520–1533
- [10] Parker C. , H. Zhang. “Biologically inspired collective comparisons by robotic swarms”. *The International Journal of Robotics Research*, 30(5):524–535, 2011.
- [11] Ren W. , R.W. Beard,: ‘Consensus seeking in multiagent systems under dynamically changing interaction topologies’, *IEEE Trans. Autom.Control*, 2005,50, (5), pp. 655–661
- [12] Ren W. , R.Beard, *Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control*. London: Springer London, 2008.
- [13] Soni A., H. Hu., *Formation control for a fleet of autonomous ground vehicles: A survey*. *Robotics*, 2018 7(4), p.67.
- [14] Vicsek T. , A. Czirok, E.B Jacob, I. Cohen, O. Schochet: ‘Novel type of phase transition in a system of self-driven particles’, *Phys. Rev. Lett.*, 1995, 75, (6), pp. 1226–1229
- [15] Zheng Y., Y. Zhu, L. Wang, “Consensus of heterogeneous multi-agent systems”. *IET Control Theory & Applications*, 5(16), 2011, pp.1881-1888.



МОНИТОРИНГ И ИЗСЛЕДВАНИЯ НА СВЪРЗАНА С ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА МРЕЖА ФОТОВОЛТАИЧНА ЕЛЕКТРОЦЕНТРАЛА В ГАБРОВО ТЕХ ПАРК

MONITORING AND INVESTIGATION OF A GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC POWER PLANT AT GABROVO TECH PARK

Plamen Tsenkov Tsankov
Technical University of Gabrovo
plamen@tugab.bg

Ivaylo Vasilev Lazarov
Technical University of Gabrovo
iv.lazarov@mail.bg

Ivaylo Petrov Stoyanov
Technical University of Gabrovo
ivo100v@gmail.com

Milko Todorov Yovchev
Technical University of Gabrovo
milkofovchev1986@gmail.com

Hristo Todorov Ibrishimov
Technical University of Gabrovo
ico@tugab.bg

Abstract

The paper presents the results of monitoring meteorological and electrical data for the operation of a grid-connected photovoltaic power plant, including subsystems with mSi, CdTe and CIGS modules, located on the territory of Gabrovo Tech Park, part of the Competence Center project "Intelligent mechatronic, eco- and energy-saving systems and technologies". Results about the change in global solar radiation, ambient temperature, electrical energy produced, and specific electrical production are presented. Variations of the specific power, solar radiation, module temperature, and ambient temperature are shown graphically.

Keywords: monitoring, solar radiation, mSi, CdTe, CIGS, photovoltaic modules.

ВЪВЕДЕНИЕ

Системите за мониторинг осигуряват постоянно наблюдение на параметрите на фотоволтаичните централи, като позволяват детайлен контрол на ефективността на работа на централата и намаляват времето за откриване на възникнали повреди на отделните ѝ компоненти. Мониторингът на фотоволтаичните централи обхваща основно две направления [1,2]. Първото направление обхваща измерване и записване на произведената електрическа енергия от фотоволтаичната централа, нивата на слънчева радиация, температурата на околната

среда, температурата на фотоволтаичните модули, скоростта на вятъра, работните ток и напрежение. Второто направление обхваща мониторинг на възникналите повреди, продължителността на планирани и непланирани ремонти на фотоволтаичната централа. Събраните данни от мониторинга на една фотоволтаична централа могат да се използват за определяне ефективността на модулите (η_{pv}) и системата (η_{sys}), специфичното електропроизводство на модулите (array yield Y_a) и системата (final yield Y_f), специфична мощност (specific power), волт-амперни характеристики на



фотоволтаичните модули, загубите във фотоволтаичната система и др. Системите за мониторинг обикновено съхраняват данни за продължителен период от време, което дава възможност да се определи степента на амортизация на фотоволтаичните модули и да се направи сравнителен анализ на характеристиките на фотоволтаичната централа за различни желани периоди от време. Данните от мониторинга на фотоволтаичните системи могат да се използват за анализ на въздействието ѝ при присъединяване към електроразпределителната мрежа.

ИЗЛОЖЕНИЕ

От месец май 2020 г на територията на Технологичния парк на Технически университет – Габрово, част от проект „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“, е в експлоатация фотоволтаична електроцентрала с обща инсталирана мощност 30kWp, състояща се от три подсистеми с различни технологии на фотоволтаичните модули [3]:

- Кадмиев телурид (CdTe)-два стринга, всеки с мощност 4,8kWp и обща инсталирана мощност 9,6kWp. Броя на модулите във всеки стринг е 48, с единична мощност 100Wp.

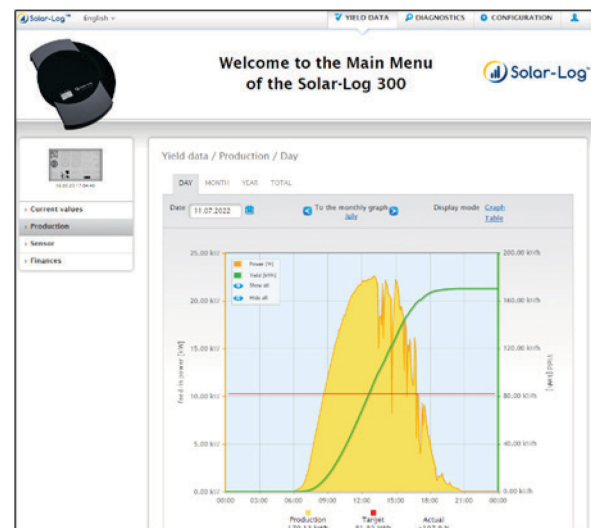
- Монокристален силиций (mSi)-два стринга, всеки с мощност 4,5kWp и обща инсталирана мощност 9 kWp. Броят на модулите във всеки стринг е 18, с единична мощност 250Wp.

- Медно-индиево-галиев селенид (CIGS)-един стринг с мощност 3,3kWp и един стринг с мощност 6,6kWp. Броят на модулите в първия стринг е 30, а във втория е 60. Общата инсталирана мощност е 9,9 kWp, единичната мощност на всеки модул е 110Wp.

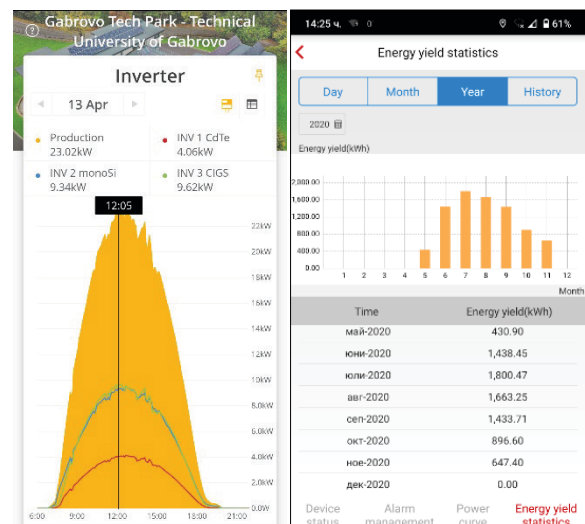
Фотоволтаичните модули са монтирани върху покривни метални конструкции, като наклона им спрямо хоризонта е 33°. Ориентацията на фотоволтаичните модули

спрямо юг е с 18,4° на изток, в резултат на конструктивни съображения [4].

Връзката на трите фотоволтаични подсистеми към мрежата се осъществява посредством три трифазни инвертора, модел SUN2000-10KTL-M0 (Huawei).



Фиг. 1. Софтуер на Solar-Log 300 на системата за мониторинг за локална LAN мрежа.



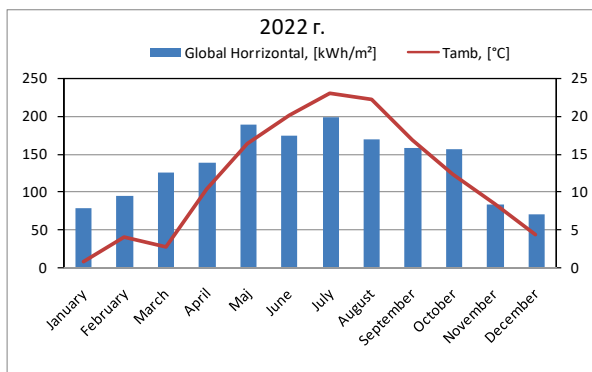
Фиг. 2. Софтуер на Solar-Log 300 и инверторите Huawei за мобилни Android устройства.

Фотоволтаичната електроцентрала е оборудвана със система за мониторинг на метеорологичните и електрически параме-



три на работа, измерваща, показваща и съхраняваща данни за слънчева радиация, температура, скорост на вятъра, токове, напрежения и електрическа мощност на всяка подсистема. Системата за мониторинг се управлява чрез интелигентен регистратор, модел Solar-Log 300, предлагащ възможност за дистанционен контрол и графична оценка на компютър или мобилно устройство – фиг. 1 и 2.

Важни фактори, влияещи върху работата на една фотоволтаична централа са измерените стойности за хоризонталната глобална слънчева радиация и околната температура. На фиг. 3. са показани измененията на стойностите за сумарната глобална хоризонтална слънчева радиация и средномесечните стойности за околната температура за месеците от 2022 г.



Фиг. 3. Изменение на стойностите за сумарната глобална хоризонтална слънчева радиация и средномесечната околна температура през 2022 г.

Измерените стойности за глобалната хоризонтална слънчева радиация са най-високи за месеците май и юли – 188,94 и 198,52 kWh/m², а най-ниски за типично зимните месеци януари и декември – 79,48 и 70,8 kWh/m². Най-високи стойности за средномесечната околна температура са отчетени през летните месеци юни, юли и август – 20, 23 и 22,17 °C, а най-ниски през месеци януари и март – 0,8 и 2,73 °C.

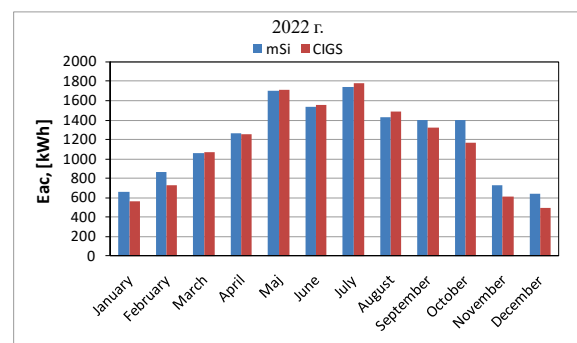
В табл. 1 са дадени стойностите за глобалната хоризонтална слънчева радиация за месеци от 2022 г.

На фиг. 4. са показани получените стойности за отдадената в електрическата мрежа от фотоволтаичните подсистеми от монокристален силиций (mSi) и медно-индиево-галиев селенид (CIGS) електрическа енергия по месеци от 2022 г.

Най-високи стойности за отдадената енергия в електрическата мрежа са отчетени за месец май – 1696,76 kWh за подсистемата от mSi и 1714,06 kWh за подсистемата от CIGS и месец юли – 1736,78 kWh за подсистемата от mSi и 1774,6 kWh за подсистемата от CIGS. За същите месеци са отчетени и най-високите стойности за глобалната хоризонтална слънчева радиация (фиг. 3).

Таблица 1. Стойности хоризонталната глобална слънчева радиация за месеци от 2022 г.

Месец от 2022 г.	Gt, [kWh/m ²]
януари	79,48
февруари	94,36
март	126,40
април	138,07
май	188,94
юни	173,88
юли	198,52
август	169,69
септември	157,66
октомври	156,18
ноември	84,14
декември	70,80



Фиг. 4. Стойности за отдадената електрическа енергия в електрическата мрежа от фотоволтаичните подсистеми от mSi и CIGS за месеците от 2022 г.



В табл. 2. са дадени стойностите за отдадената в мрежата електрическа енергия от фотоволтаичните подсистеми от монокристален силиций (mSi) и медно-индиево-галиев селенид (CIGS) за месеците от 2022 г.

Таблица 2. Стойности за отдадената в мрежата електрическа енергия от фотоволтаични подсистеми от mSi и CIGS за месеци от 2022 г.

Месец от 2022 г.	Фотоволтаична подсистема	
	mSi	CIGS
	E_{ac} , [kWh]	E_{ac} , [kWh]
януари	660,40	559,85
февруари	867,04	732,16
март	1057,34	1066,74
април	1264,04	1257,66
май	1696,76	1714,06
юни	1538,91	1559,22
юли	1736,78	1774,60
август	1432,24	1486,01
септември	1399,35	1325,10
октомври	1396,41	1170,52
ноември	732,92	610,17
декември	639,63	496,41

За по-коректна оценка на производителността на различните технологии фотоволтаични подсистеми се въвежда параметъра „специфично електропроизводство“ (final yield Y_f) [5]:

$$Y_f = \frac{E_{ac}}{P_{pv,rated}} \quad (1)$$

където: E_{ac} е отдадената в електрическата мрежа електрическа енергия, [kWh];

$P_{pv,rated}$ – инсталираната мощност на фотоволтаичните модули, [kWp].

За даден месец от годината, Y_f се определя с израза [6]:

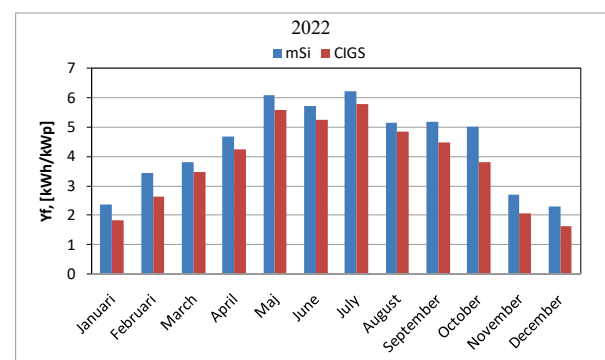
$$Y_{f,m} = \frac{1}{N} \sum_{d=1}^N Y_{f,d} \quad (2)$$

където N е броят на дните в месеца.

На фиг. 5. са показани изчислените стойности за Y_f за месеци от 2022 г., на фотоволтаични подсистеми от монокристален силиций (mSi) и медно-индиево-галиев селенид CIGS. Най-високи стойности

за Y_f са получени отново за месеци май и юли, но стойностите подсистемата от mSi са по-високи спрямо тези за подсистемата от CIGS модули.

Стойностите за Y_f за месец май са съответно 6,08kWh/kWp за подсистемата от mSi и 5,59kWh/kWp за подсистемата от CIGS. За месец юли, изчислените стойности за Y_f са 6,23kWh/kWp за подсистемата от mSi и 5,78kWh/kWp за подсистемата от CIGS.



Фиг. 5. Стойности за “final yield” Y_f за фотоволтаични подсистеми от mSi и CIGS за месеците от 2022 г.

В табл. 3 са дадени средномесечните стойности за Y_f на фотоволтаичните подсистеми от CdTe, mSi и CIGS за 2022 г.

Таблица 3. Стойности за Y_f за фотоволтаични подсистеми от mSi и CIGS за месеци от 2022 г.

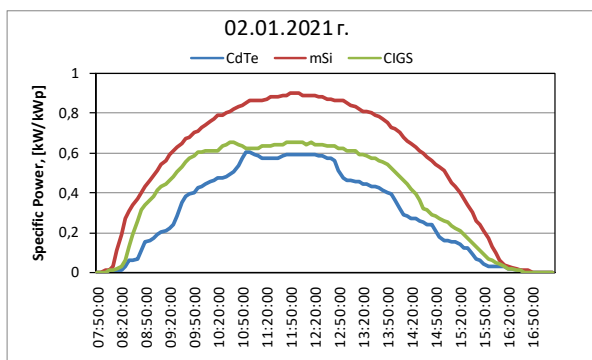
Месец от 2022 г.	Фотоволтаична подсистема	
	mSi	CIGS
	Y_f , [kWh/kWp]	Y_f , [kWh/kWp]
януари	2,37	1,82
февруари	3,44	2,64
март	3,79	3,48
април	4,68	4,23
май	6,08	5,59
юни	5,70	5,25
юли	6,23	5,78
август	5,13	4,84
септември	5,18	4,46
октомври	5,00	3,81
ноември	2,71	2,06
декември	2,292	1,62

На фиг. 6, 7 и 8 са показани измененията на специфичната мощност на трите типа

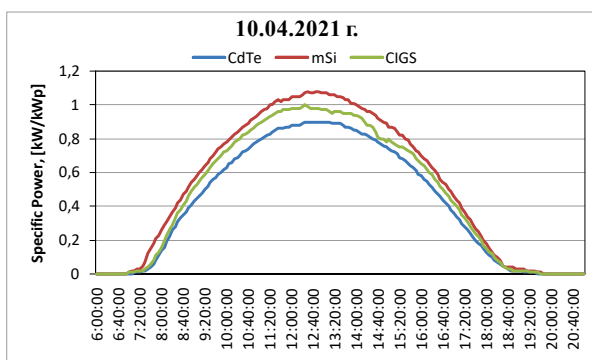


фотоволтаични системи за отделни дни от различни сезони през 2021 г., характеризиращи се със слънчево и ясно време – 2 януари, 10 април и 19 август.

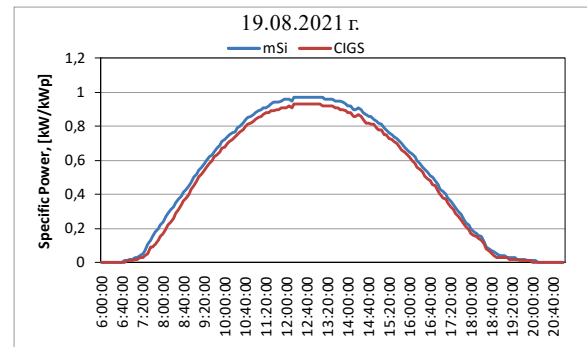
Най-високи стойности за специфичната мощност са получени за фотоволтаичната подсистема от модули от mSi. От трите разглеждани дни, най-високи са стойностите за специфичната мощност за 10.04.2021 г. - 0,9kW/kWp за CdTe, 1,08kW/kWp за mSi и 1kW/kWp за CIGS. Максимумът на изменението на специфичната мощност зависи от годишния сезон, като за 02.01.2021 г. той е между 11:50h и 12:20h, а за 19.04.2021 г. и 19.08.2021 г. е между 12:30h и 12:45h.



Фиг. 6. Изменение на специфичната мощност за PV подсистеми от CdTe, mSi и CIGS за 02.01.2021 г.

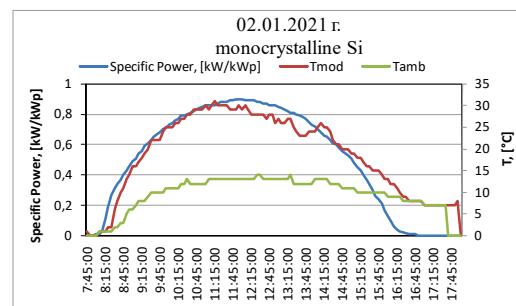


Фиг. 7. Изменение на специфичната мощност за PV подсистеми от CdTe, mSi и CIGS за 10.04.2021 г.

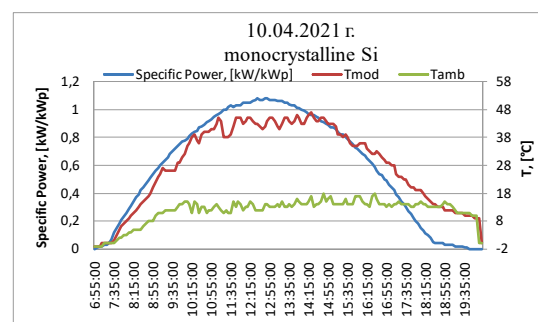


Фиг. 8. Изменение на специфичната мощност за PV подсистеми от mSi и CIGS за 19.08.2021 г.

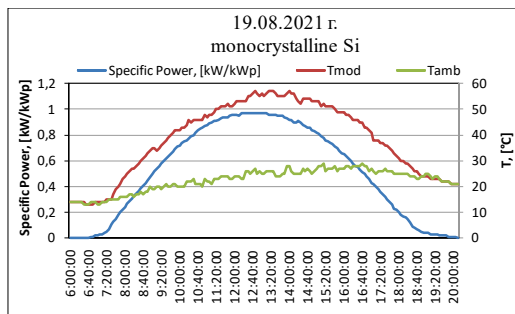
На фиг. 9, 10 и 11 е показано изменението на специфичната мощност, температурата на модулите и околната температура на фотоволтаичната подсистема от mSi за отделни дни от различни сезони през 2021 г., характеризиращи се със слънчево и ясно време – 2 януари, 10 април и 19 август.



Фиг. 9. Изменение на специфичната мощност подсистемата от mSi, температурата на модулите и околната температура на 02.01.2021 г.



Фиг. 10. Изменение на специфичната мощност подсистемата от mSi, температурата на модулите и околната температура на 10.04.2021 г.



Фиг. 11. Изменение на специфичната мощност подсистемата от mSi , температурата на модулите и околната температура на 19.08.2021 г.

За 02.01.2021 г. максималните стойности за специфичната мощност $0,9kW/kWp$ са получени при температура на модулите $30^{\circ}C$, която е с $17^{\circ}C$ по-висока от тази на околната среда. Получените максимални стойности за специфичната мощност за 10.04.2021 г. са $1,08kW/kWp$, при температура на модулите $42^{\circ}C$, като разликата с околната температура е $14^{\circ}C$. За 19.08.2021 г. е получена максимална стойност за специфичната мощност $0,97kW/kWp$ при температура на модулите $(55\div 57)^{\circ}C$. Разликата с температурата на околната среда е около $30^{\circ}C$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализът на резултатите от мониторинга на фотоволтаична електроцентрала в Габрово Тех Парк, част от Проект Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“, показват реализираната функционалност измерване, визуализация и съхраняване на данни за слънчевата радиация, температурата на околната среда и модулите, мощността на подсистемите, отдадената в електроразпределителната мрежа електрическа енергия. Това позволява да се определи и проследи изменението във времето на важни експлоатационни параметри и характеристики за фотоволтаичните подсистеми с различни технологии на модулите. На база на получените резултати, изследователите от екипа в научно-из-

следователска лаборатория С7.3 „Екологични, енергоспестяващи и електромагнитно съвместими светлотехнически, LED и ВЕИ компоненти и технологии“, продължават разработката на математически модели за оценка и прогнозиране на ефективността и произведената електрическа енергия от различни типове фотоволтаични модули. Високото научно приложно ниво на изследванията в областта на фотоволтаичните технологии в лабораторията се потвърждава от издадените в периода 2020÷2022 г. 11 броя научни публикации в България и чужбина, 5 от които са реферирани в международната база данни Scopus.

БЛАГОДАРНОСТ

Настоящите изследвания е подкрепена от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Наука и образование за интелигентен растеж 2014 - 2020“, Проект Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“, № BG05M2OP001-1.002-0023.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Monitoring of photovoltaic systems. Energy Review magazine, issue 3, 2016, pp. 23-25.
- [2] Remote monitoring of photovoltaic plants. Energy Review magazine, issue 1, 2011, pp. 31-34.
- [3] Tsankov P., I. Lazarov. Annual performance analysis of photovoltaic systems with mono Si, GdTe and CIGS modules. UNITECH 2022 International Scientific Conference, November 18-19, 2022.
- [4] Tsankov, P. Reducing climate by installing a new photovoltaic power plant in Bulgaria. CONTEMPORARY MATERIALS, 12(2). 2021, pp. 126-139. ISSN 1986-8677.
- [5] IEC 617241:2021 Photovoltaic system performance-Part 1: Monitoring
- [6] Baghdadadi I., A. E. Yaakoubi, K. Attari, Z. Leemrani, A. Asselman. Performance investigation of a PV system connected to the grid. 11th International Interdisciplinary in Engineering, INTER-ENG 2017, 5-6 October 2017 Tirgu-Mures, Romania.



ВЛИЯНИЕ НА ИЗХОДНИ ВЕРИГИ ВЪРХУ ВИБРАЦИОННИ ПИЕЗОЕЛЕКТРИЧНИ ХАРВЕСТЕРИ

Румяна Стоянова, Димо Колев, Велимира Тодорова

ТУ – Габрово

ruma_stoyanova@abv.bg (Р. С.), *uplift7@mail.bg* (Д. К.), *vili@tugab.bg* (В. Т.)

Abstract

Определянето на енергията, която може да бъде получена от енергийните харвестери, е една от важните задачи в процеса на тяхното проектиране, тъй като за по-добра оценка на техните възможности сравнително малкото количество добивана енергия трябва да бъде прецизно оценено. Следователно изходната верига на тези устройства е важен фактор при определяне на изходната мощност.

ВЪВЕДЕНИЕ

Настоящата човешка цивилизация е неразривно свързана с електричеството, тъй като то се използва за хранване на разнообразни устройства. Поради това необходимият обем електрическа енергия непрекъснато се увеличава с нарастването на човешката популация и нейните нужди. Един от методите за хранване на електрически устройства с ниска консумация е използването на методите за енергийно събиране (EH – Energy Harvesting или Energy Scavenging). Процесът на енергийно събиране обикновено е извличане на електрическа енергия от някакъв външен източник, който не е подходящ за широкомащабно производство на енергия и след това нейното трансформиране и съхраняване за малки, обикновено автономни устройства. Източникът на извличаната мощност обикновено е фоновото явление, което няма пряко значение, или естеството му е донякъде паразитно по отношение на хранваната система.

Енергийни Източници	Енергийна Плътност
Светлина	100 mW/cm ² (слънчева светлина) 100 W/cm ² (изкуствена светлина)
Термоелектрични	60 W/cm ²
Вибрации (микрoгенерации)	4 W/cm ³ (човешки движения – Hz) 800 W/cm ³ (машини – kHz)
Вибрации (пиезоелектрични)	200 μW/cm ³
Въздушни потоци	1 μW/cm ²
Тактилни усилia	50 J/N
Пиезоелектрици в облекло	330 μW/cm ²
Ръчни електрогенератори	30 W/kg

Някои от тези системи се използват в устройства за самостоятелно хранване, например енергията на океанските вълни, използвана от автономни сензори за океанографски мониторинг, докато други се прилагат в преносима електроника, където могат да хранват или презареждат мобилни телефони, специализирани компютри, радио комуникационно оборудване и др.

Всички тези устройства трябва да са достатъчно здрави, за да издържат на продължително излагане на враждебна среда, и да имат широк диапазон на динамична чувствителност.

Таблица I. ИЗТОЧНИЦИ ЗА ЕНЕРГИЙНО СЪБИРАНЕ [1]

Енергийни Източници	Енергийна Плътност
Акустични	0,003 μW/cm ³ , за 75 dB 0,96 μW/cm ³ , за 100 dB
Температурна разлика	10 μW/cm ³
Фонов радиочестоти	1 μW/cm ²



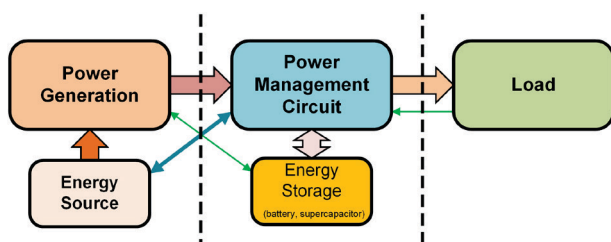
ИЗЛОЖЕНИЕ

Типове популярни методи за енергийно събиране

Класификацията на различните устройства за събиране на енергия (ЕН) може да бъде съставена според вида на техния първичен източник на енергия. Тази енергия може да бъде от термичен, вибрационен, светлинен или звуков тип. Определящите параметри обикновено са енергийната плътност на източника и ефективността на преобразуване и изходната енергийна плътност на харвестерите. Таблица 1 сравнява различни видове източници за енергийни харвестери, като източниците са видове природни явления [1].

В зависимост от източника на енергия харвестерите се различават по конструкция и начин на работа. Освен това всеки тип харвестер има различни изходни сигнали – например: по форма и сила на изходния сигнал. На фиг. 1 е представена обобщена блокова схема на процесите на преобразуване на енергията на различни видове харвестери.

Въпреки различните принципи на работа и различни структури за различните видове устройства за събиране на енергията, те обикновено се състоят от три части: първата е енергийния източник, от който ще се извлича електрическата енергия, а втората е механизмът за енергийно събиране: състои се от структура, която преобразува енергията на околната среда в електрическа енергия.



Фиг. 1. Обща блок-диаграма на енергийни харвестери

Последната е товарът: всъщност устройство, което консумира или съхранява изходната електрическа енергия (фиг. 1).

Общата глобална цел по отношение на устройствата за енергийно събиране е да се повиши тяхната ефективност с по-съвършени технологии за извличане или, в краен случай, да се оползотворят отпадъчни продукти от промишлени или подобни дейности като топлина, вибрации, шум, повишен електромагнитен фон и други [2, 3].

Един от по-широко използваните методи за преобразуване на механични усилия в електрическа енергия е пиезоелектричното преобразуване. Пиезоелектричните ЕН имат определени предимства – като относително високо съотношение на изходно напрежение/механично напрежение; относително лесни методи за производство на пиезоелектрични елементи и др. Поради предимствата на пиезоелектричните преобразуватели, те са обект на обширни изследвания за мобилни микро електрически автономни източници [4].

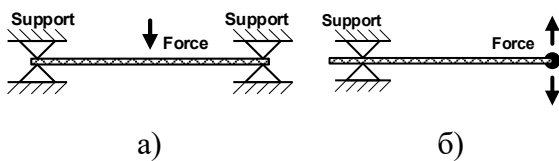
Пиезоелектрични вибрационни харвестери

Вибрационните пиезоелектрични събиращи системи имат относително най-голямо преобразователно съотношение [5] без голяма зависимост от външни фактори. Някои харвестери са проектирани да събират отпадъчната енергия от човешкото движение, тъй като се монтират в част от човешко облекло или аксесоари – например вибрационните харвестери се монтират в подметките на обувките [6]. Други типове са неподвижно монтирани на подходящи места, така че преминаващите превозни средства [7, 8] или пешеходци да упражняват механична сила върху тях.

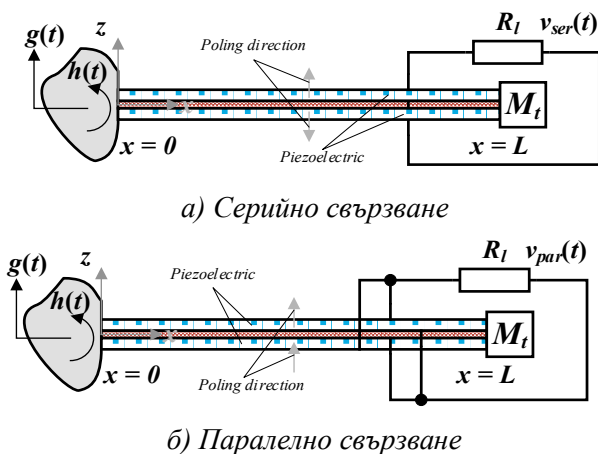
Вибриращият пиезоелектричен харвестер може да се разглежда като обобщен случай на гредова структура с един или два застопорени края (показани на фиг. 2), описвана най-общо от гредовата теорията на Ойлер-Бернули [7]. Параметрите, опи-

сани на фиг. 3, са дължината на гредата – L , добавената маса на върха – M_t , съпротивлението на електрическия товар – R_L .

Напреженията върху резистивния товар съответно за случаите на последователно и паралелно свързване – $v_{ser}(t)$ и $v_{par}(t)$ [7].



Фиг. 2. Закрепване на гредови вибрационен пиезоелектричен харвестер



Фиг. 3. Обща диаграма на събирателно устройство с два активни слоя [7]

Това се дължи на факта, че структурата на ЕН (показана на фиг. 3) има два активни (пиезоелектрични) слоя, които са свързани за увеличаване изходната електрическа токова плътност.

Обикновено се приема, че гредовата пиезоелектрична система се възбужда чрез движението на своята основа. Тогава, ако изместването и малкото въртене на основата са представени съответно с $g(t)$ и $h(t)$, както е показано на фиг. 3, движението на основата $w_b(x, t)$ на гредата може да бъде представено като [7, 9]:

Еквивалентните електромеханични уравнения, описващи механичната и напреженовата реакция на двуслойната система, могат да бъдат представени като [7]:

$$\frac{d^2 \eta_r(t)}{dt^2} + 2\zeta_r \omega_r \frac{d\eta_r(t)}{dt} + \omega_r^2 \eta_r(t) + \tilde{\theta}_r v(t) = f_r(t) \quad (2)$$

$$C_p^{eq} \frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{R_l} = \sum_{r=1}^{\infty} \tilde{\theta}_r \frac{d\eta_r(t)}{dt} \quad (3)$$

където:

- $\tilde{\theta}_r$ – модален коефициент на електромеханична връзка;
- C_p^{eq} – еквивалентен капацитет (зависи от вида на свързване между слоеве);
- $f_r(t)$ – модална механична “принудителна” функция;
- $v(t)$ – напрежение върху резистивния товар;
- ζ_r – коефициент на механично затихване;
- $\eta_r(t)$ – механична модална реакция;
- ω_r – незатихваща собствена честота на r -тия режим.

Дясната страна на (3) е изразът, описващ електрическия ток, който теоретично може да бъде получен от харвестера. Описателните модели на пиезоелектрически харвестери обикновено представят механичните усилия, които влияят на структурата чрез частични диференциални уравнения от втори ред, както е показано в (2) [7, 9].

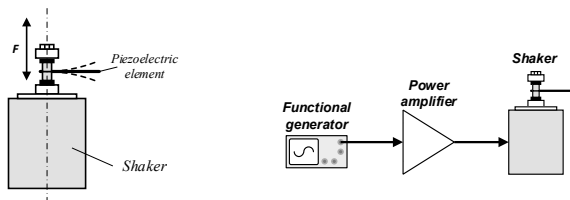
Но проблемът с математическия модел, базиран на горните уравнения за вибриращи пиезоелектрични ЕН системи, е, че някои константи и променливи в уравненията зависят от физически величини, които са косвено или изобщо не са свързани с основните променливи, които съставляват общите математически модели – например температурата в пиезоелектричните среди не е пряко включена в описващите уравнения [7, 8].

$$w_b(x, t) = g(t) + xh(t) \quad (1)$$

Експериментална постановка за изследвания на пиезоелектричен вибрационен ЕН

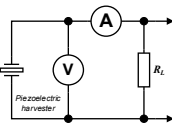


Експерименталните изследвания се провеждат върху наличен в търговската мрежа пиезоелектричен харвестер [10], който ще гарантира, че има осигурена степен на повторямост на параметрите на харвестера. Харвестерът е двуслойна структура с последователно свързване на слоевете – S233-H5FR-1107XB (предишно обозначение PPA-2014). За имитиране на външните механични напрежения се използва електромеханичен шейкър с ускорение $a = 5,21 \text{ m/s}^2$ (фиг. 4а), а за подаване на хармоничен сигнал чрез усилвател към него се използва функционален генератор (фиг. 4б).



а) Електромеханичен шейкър

б) Управление на системата



в) Измервателна схема

Фиг. 4. Базов експериментална установка

Функционалният генератор се използва за промяна на работната честота, докато изходното му напрежение е постоянно и има стойност от 2 V (върхова стойност). Измерванията се извършват с цифрови устройства, които дават съответните стойности на променливата под формата на средноквадратичен корен (RMS).

Всъщност тази форма на представяне на данни е полезна, тъй като за променливи електрически токове и напрежения, RMS е равна на стойността на постоянния ток или напрежение, която създава еквивалентната средна мощността върху постоянен резистивен товар. По този начин мощността, която се измерва на теория, трябва да бъде

действителната активна мощност, която може лесно да бъде извлечена и е основната цел на процеса на енергийно извличане.

Предварителни експериментални резултати

Първите експерименти се провеждат с инерционна маса $m = 1,13 \text{ g}$ с различни стойности за R_L и единична честота $f = 113 \text{ Hz}$. Първоначалното напрежение от функционалния генератор е 2,65 V върхова стойност (peak-to-peak). Резултатите за напрежението са в очаквания диапазон, но токовете стойности са леко странни, защото надвишават очакваните стойности (Таблица II).

Стойностите на мощността се изчисляват съответно за напрежението (P_U), тока (P_I) и тяхното произведение (P_{UI}), тъй като съпротивлението на електрическото натоварване е известно (Таблица III).

Таблица II. ПЪРВОНАЧАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

R_L, Ω	390	1000	2400	5100	10000	12400	24000	51000	75000	100000
U_{RMS}, V	1,302	1,457	1,872	2,37	3,18	3,47	4,34	5,15	5,47	5,58
I_{RMS}, mA	4	3,92	3,68	3,46	3,10	2,92	2,38	1,62	1,22	1,14

Таблица III. ДАННИ ЗА ПОЛУЧЕНАТА ЕНЕРГИЯ

	U_{RMS}	I_{RMS}	P_U	P_I	P_{UI}
R_L, Ω	[V]	[mA]	[mW]	[mW]	[mW]
390	1,302	4	4,347	6,24	5,208
1000	1,457	3,92	2,123	15,366	5,711
2400	1,872	3,68	1,46	32,502	6,889
5100	2,37	3,46	1,101	61,055	8,2
10000	3,18	3,1	1,011	96,1	9,858
12400	3,47	2,92	0,971	105,727	10,132
24000	4,34	2,38	0,785	135,946	10,329
51000	5,15	1,62	0,52	133,844	8,343
75000	5,47	1,22	0,399	111,63	6,673
100000	5,58	1,14	0,311	129,96	6,361

Резултатите за електрическата мощност са толкова различни, че предположението за грешна експериментална установка не е пресилено.



Но има и друго обяснение: посочените стойности са за реактивна мощност, която е налична в системата и изобщо не може да бъде извлечена. Честотата на процеса е сравнително ниска (113 Hz), но пиезоелектричният елемент, който генерира електрическите колебания, има предимно капацитивни характеристики и неговият вътрешен импеданс може съответно да бъде заменен от неговото реактивно съпротивление в еквивалентните вериги, както се вижда в (3) на C_p^{eq} .

По този начин изправянето на електрическия сигнал на харвестера е необходимо за правилна оценка на получената енергия, тъй като токоизправителят трябва да елиминира влиянието на реактивната енергия. Следователно, експерименталната верига е разширена с добавянето на пълен токоизправителен мост.

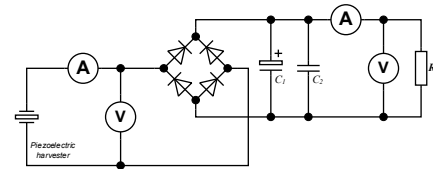
Експериментална верига с изправител

Пълният мостов токоизправител и капацитивните елементи се добавят към експерименталната схема, както е показано на фиг. 5, тъй като диодите са от тип 1N4148 и капацитивните елементи имат следните стойности: $C_1 = 1 \mu F$ и $C_2 = 10 nF$.

Механичната честота е 115 Hz, а големината на напрежението на генератора е 2 V върхова стойност. Експерименталната постановка е разделена на AC част и DC част, а експерименталните вериги са за тип VA и AV (фиг. 5). Вярно е, че част от енергията ще бъде загубена в токоизправителния мост и в капацитивните елементи, но само използваемата част от електрическата енергия ще се разсейва върху постоянния електрически товар R_L .

Получената постоянна мощност е много по-малка от тази, засечена преди токоизправителя (Таблица IV), но също така няма признаци за нагриване на диодите, което да показва по-голяма консумация в токоизправителя. Но изчислените мощности не се различават забележимо една от друга. По този начин може да се предположи, че го-

ляма част от засечената по-рано енергия е от реактивен тип и е безполезна за целите на енергийно събиране.



Фиг. 5. Експериментална установка с изправител

Таблица IV. ЕКСПЕРИМЕНТИ С ИЗПРАВИТЕЛНА ВЕРИГА

R_L , Ω	U_{RMS} [V]	I_{RMS} [mA]	P_U [mW]	P_I [mW]	P_{UI} [mW]	U_{DC} [V]	I_{DC} [mA]	P_{Udc} [mW]	P_{Idc} [mW]	P_{UIdc} [mW]
1000	1,3	2,9	1,69	8,41	3,77	0,2	0,245	0,04	0,060	0,049
2400	1,6	2,74	1,067	18,02	4,384	0,55	0,227	0,126	0,124	0,125
5100	1,99	2,56	0,776	33,42	5,094	0,99	0,208	0,192	0,221	0,206
7500	2,3	2,42	0,705	43,92	5,566	1,39	0,188	0,258	0,265	0,261
10000	2,58	2,3	0,666	52,90	5,934	1,74	0,174	0,303	0,303	0,303
12400	2,75	2,12	0,61	55,73	5,83	1,98	0,158	0,316	0,31	0,313
24000	3,38	1,72	0,476	71,00	5,814	2,9	0,128	0,35	0,357	0,354
51000	4,03	1,16	0,318	68,63	4,675	3,97	0,076	0,309	0,295	0,302
75000	4,26	0,9	0,242	60,75	3,834	4,5	0,055	0,27	0,227	0,248
100000	4,39	0,82	0,193	67,24	3,6	4,62	0,049	0,213	0,24	0,226

Може да се спекулира, че токоизправител трябва да бъде включен във веригите за оценка на пиезоелектрическите харвестери, тъй като това е единственият надежден начин за правилно оценяване на изходната енергия. Резултатите (показани на фиг. 6) за изходната мощност след токоизправителя отговарят на очакванията и няма явни разлики между изчислените резултати. Има известна разлика в изчислените енергии, както е показано на фиг. 6б при увеличаване на електрическия товар над най-ефективната стойност (стойността, при която изходната енергия е максимална), което може да се отдаде на известна

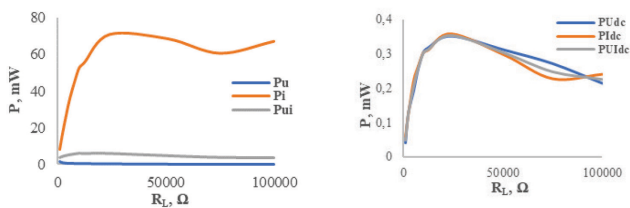


промяна в активната и реактивната част на електрическия товар.

Зависимостта между получената електрическа енергия и еквивалентния капацитет, както е показано в (3), теоретично също трябва да доведе до зависимост между общия капацитет на изходната верига и обема на получената енергия.

Зависимост между изходната енергия и изходния капацитет

Провеждат се експерименти, за да се определи връзката между изходния капацитет и обема на електрическата енергия. Механичните напрежения са същите, а промените са в честотата и свързания капацитет в изхода. Резултатите за 1 μF , 47 μF и 100 μF са дадени съответно в таблица V, таблица VI и таблица VII.



а) преди изправителя б) след изправителя

Фиг. 6. Резултати преди и след изправителя

Таблица V. ВЛИЯНИЕ НА КАПАЦИТЕТА ПРИ 1 μF

R_L, Ω	f, Hz	120	121	122	123	124	125	126	127
1000	P_{Udc}	0,28 1	0,25 0	0,24 0	0,24 0	0,24 0	0,31 4	0,42 3	0,33 6
	P_{Idc}	0,29 7	0,27 9	0,26 5	0,25 7	0,26 2	0,32 4	0,43 4	0,36 2
	P_{UIdc}	0,28 9	0,26 4	0,25 2	0,24 8	0,25 1	0,31 9	0,42 8	0,34 9
2400	P_{Udc}	0,65 1	0,65 1	0,63 0	0,60 0	0,64 1	0,90 0	1,05 3	0,90 0
	P_{Idc}	0,56 0	0,54 4	0,52 1	0,50 8	0,53 9	0,73 7	0,89 9	0,76 1
	P_{UIdc}	0,60 4	0,59 5	0,57 3	0,55 2	0,58 8	0,81 4	0,97 3	0,82 8
5100	P_{Udc}	0,86 5	0,83 2	0,81 6	0,83 2	0,86 5	1,55 9	1,36 7	1,17 7
	P_{Idc}	0,93 0	0,87 0	0,85 3	0,86 1	0,96 1	1,72 2	1,48 7	1,28 5
	P_{UIdc}	0,89 7	0,85 1	0,83 4	0,84 7	0,91 1	1,63 8	1,42 6	1,23 0

7500	P_{Udc}	1,14 5	1,11 4	1,13 7	1,47 9	2,05 9	2,28 5	2,10 1	1,83 5
	P_{Idc}	1,13 5	1,09 4	1,16 4	1,43 2	1,98 1	2,20 3	2,02 0	1,75 0
	P_{UIdc}	1,14 0	1,10 4	1,15 0	1,45 5	2,02 0	2,24 4	2,06 0	1,79 2
10k	P_{Udc}	1,20 4	1,17 0	1,21 8	1,33 2	1,78 1	1,69 7	2,24 7	1,92 7
	P_{Idc}	1,11 6	1,09 6	1,13 6	1,23 9	1,70 6	2,47 0	2,10 7	1,83 2
	P_{UIdc}	1,15 9	1,13 2	1,17 6	1,28 5	1,74 3	2,04 8	2,17 6	1,87 9
51k	P_{Udc}	1,14 2	1,09 7	1,16 0	1,28 3	1,66 0	2,60 7	2,26 6	2,02 0
	P_{Idc}	1,01 4	0,97 1	1,02 8	1,13 2	1,47 4	2,35 7	2,04 0	1,78 3
	P_{UIdc}	1,07 6	1,03 2	1,09 2	1,20 5	1,56 4	2,47 9	2,15 0	1,89 8
75k	P_{Udc}	0,95 0	0,88 3	0,95 2	1,08 2	1,37 4	2,14 0	1,97 2	1,73 6
	P_{Idc}	0,78 0	0,76 5	0,82 7	0,90 8	1,13 5	1,55 5	1,62 1	1,40 8
	P_{UIdc}	0,86 1	0,82 2	0,88 7	0,99 1	1,24 8	1,82 4	1,78 8	1,56 3
100k	P_{Udc}	0,81 4	0,79 2	0,83 5	0,91 8	1,31 3	1,81 4	1,61 5	1,42 3
	P_{Idc}	0,88 4	0,84 6	0,90 3	0,96 0	1,34 6	1,96 0	1,74 2	1,51 3
	P_{UIdc}	0,84 8	0,81 9	0,86 8	0,93 9	1,32 9	1,88 6	1,67 8	1,46 7

Получените данни потвърждават предположението, че изходният капацитет има влияние върху получаваната енергия от пиезоелектричния ЕН, както е показано на фиг. 7. Сравнението между характеристиките (фиг. 7) показва, че има разлика между най-ефективната честота за енергия събиране в зависимост от свързания изходен капацитет, както и има промяна в най-подходящия електрически товар за максимално събиране на енергия по отношение на честотата на механичните усилия. Тези фактори допълнително усложняват проектирането на общ модел на вибрационен пиезоелектричен ЕН с цел максимизиране на изхода на електрическа енергия. Получаваната енергия е в диапазона от няколко mW и всеки допълнителен половин миливат е ценен.

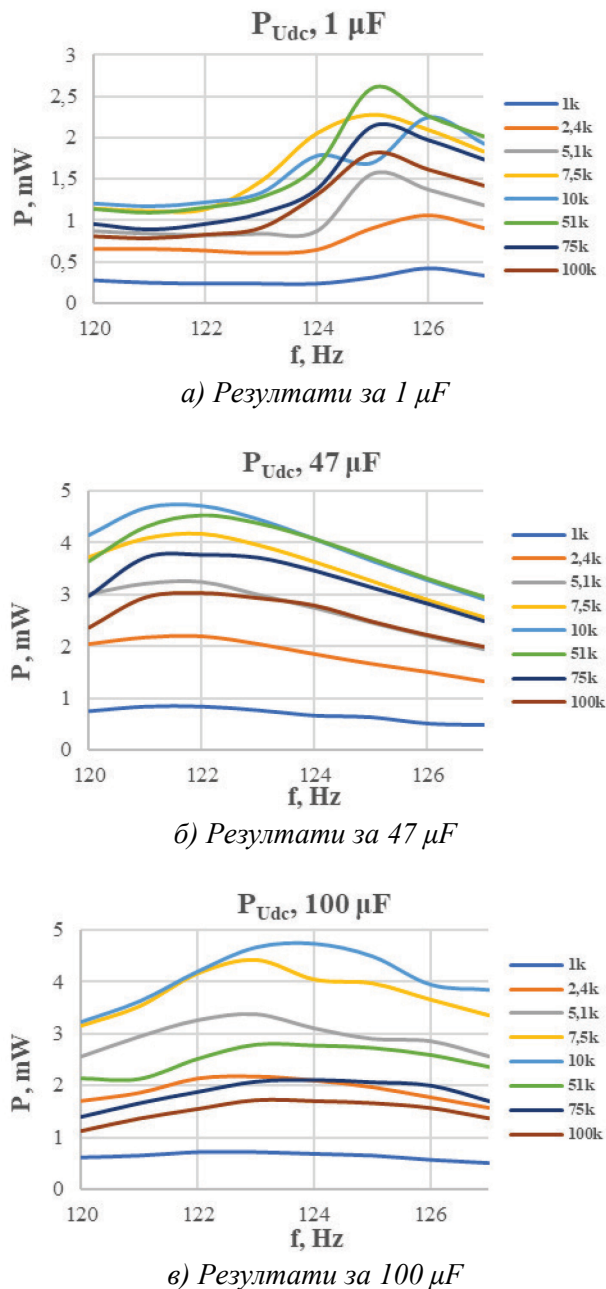


Таблица VI. ВЛИЯНИЕ НА КАПАЦИТЕТА ПРИ 47 μF

R_L, Ω	f, Hz	120	121	122	123	124	125	126	127
1000	P_{Udc}	0,75 7	0,84 6	0,84 6	0,77 4	0,67 2	0,64 0	0,51 8	0,49 0
	P_{Idc}	0,94 1	1,04 0	1,04 0	0,96 0	0,87 8	0,79 9	0,70 6	0,61 8
	P_{UIdc}	0,84 4	0,93 8	0,93 8	0,86 2	0,76 8	0,71 5	0,60 5	0,55 0
2400	P_{Udc}	2,05 4	2,18 5	2,20 4	2,05 4	1,85 5	1,66 7	1,50 4	1,32 0
	P_{Idc}	1,91 8	2,10 3	2,14 8	2,03 6	1,79 6	1,59 4	1,43 4	1,26 8
	P_{UIdc}	1,98 5	2,14 3	2,17 6	2,04 5	1,82 5	1,63 0	1,46 9	1,29 4
5100	P_{Udc}	3,01 3	3,21 6	3,24 8	2,99 8	2,74 3	2,45 7	2,18 7	1,93 3
	P_{Idc}	3,33 8	3,64 2	3,66 7	3,42 9	3,11 9	2,79 3	2,49 9	2,20 8
	P_{UIdc}	3,17 1	3,42 2	3,45 1	3,20 6	2,92 5	2,62 0	2,33 8	2,06 6
7500	P_{Udc}	3,73 1	4,09 2	4,18 1	3,96 0	3,63 3	3,26 7	2,89 5	2,55 8
	P_{Idc}	3,91 0	4,26 4	4,35 5	4,14 0	3,81 3	3,43 7	3,05 3	2,70 9
	P_{UIdc}	3,81 9	4,17 7	4,26 7	4,04 9	3,72 2	3,35 1	2,97 3	2,63 2
10k	P_{Udc}	4,14 7	4,66 5	4,70 6	4,44 9	4,07 0	3,66 0	3,28 3	2,91 6
	P_{Idc}	4,23 8	4,73 3	4,74 7	4,51 6	4,18 6	3,73 3	3,35 2	2,97 0
	P_{UIdc}	4,19 2	4,69 9	4,72 7	4,48 2	4,12 8	3,69 7	3,31 8	2,94 3
51k	P_{Udc}	3,64 3	4,29 5	4,51 8	4,36 5	4,06 6	3,69 6	3,30 9	2,96 2
	P_{Idc}	3,52 8	4,34 8	4,46 8	4,14 2	3,97 0	3,58 1	3,21 3	2,86 5
	P_{UIdc}	3,58 5	4,32 2	4,49 3	4,25 2	4,01 8	3,63 8	3,26 0	2,91 3
75k	P_{Udc}	2,97 6	3,71 4	3,76 3	3,71 0	3,46 0	3,14 2	2,83 0	2,49 5
	P_{Idc}	2,94 0	3,63 0	3,73 0	3,66 3	3,43 5	3,03 0	2,73 6	2,48 4
	P_{UIdc}	2,95 8	3,67 2	3,74 6	3,68 6	3,44 8	3,08 5	2,78 3	2,49 0
100k	P_{Udc}	2,35 9	2,94 8	3,03 1	2,93 4	2,78 9	2,48 1	2,21 4	1,98 5
	P_{Idc}	2,89 0	3,53 4	3,72 5	3,42 3	3,34 9	3,02 8	2,72 3	2,40 3
	P_{UIdc}	2,61 1	3,22 8	3,36 0	3,16 9	3,05 6	2,74 1	2,45 5	2,18 4

Таблица VII. ВЛИЯНИЕ НА КАПАЦИТЕТА ПРИ 100 μF

R_L, Ω	f, Hz	120	121	122	123	124	125	126	127
1000	P_{Udc}	0,62 4	0,65 6	0,72 3	0,72 3	0,68 9	0,65 6	0,57 8	0,51 8
	P_{Idc}	0,69 2	0,81 9	0,86 7	0,90 3	0,86 5	0,77 4	0,70 6	0,64 0
	P_{UIdc}	0,65 7	0,73 3	0,79 1	0,80 8	0,77 2	0,71 3	0,63 8	0,57 6
2400	P_{Udc}	1,70 0	1,85 5	2,12 8	2,16 6	2,09 1	1,96 2	1,76 8	1,56 8
	P_{Idc}	1,43 0	1,73 4	1,97 4	2,00 1	1,97 9	1,85 4	1,66 1	1,50 2
	P_{UIdc}	1,55 9	1,79 4	2,05 0	2,08 2	2,03 4	1,90 7	1,71 4	1,53 5
5100	P_{Udc}	2,56 9	2,95 2	3,26 4	3,37 7	3,10 6	2,90 6	2,86 1	2,56 9
	P_{Idc}	2,67 3	3,33 0	3,38 8	3,59 9	3,51 3	3,46 3	3,24 8	2,94 6
	P_{UIdc}	2,62 1	3,13 5	3,32 5	3,48 6	3,30 3	3,17 2	3,04 8	2,75 1
7500	P_{Udc}	3,16 2	3,53 6	4,16 6	4,42 4	4,04 8	3,97 5	3,66 1	3,36 0
	P_{Idc}	3,33 7	3,70 7	4,24 1	4,36 6	4,16 3	3,93 1	3,67 5	3,55 0
	P_{UIdc}	3,24 8	3,62 0	4,20 4	4,39 5	4,10 5	3,95 3	3,66 8	3,45 4
10k	P_{Udc}	3,22 6	3,62 4	4,19 9	4,66 5	4,73 3	4,48 9	3,94 4	3,84 4
	P_{Idc}	3,15 8	3,69 7	4,26 4	4,63 8	4,72 0	4,55 6	4,18 6	3,88 1
	P_{UIdc}	3,19 2	3,66 0	4,23 1	4,65 1	4,72 7	4,52 3	4,06 3	3,86 3
51k	P_{Udc}	2,14 1	2,13 3	2,52 1	2,79 5	2,77 7	2,73 0	2,59 3	2,36 4
	P_{Idc}	2,04 0	2,12 2	2,42 4	2,74 5	2,84 0	2,84 0	2,55 9	2,35 7
	P_{UIdc}	2,09 0	2,12 8	2,47 2	2,77 0	2,80 8	2,78 5	2,57 6	2,36 1
75k	P_{Udc}	1,40 4	1,66 7	1,88 2	2,08 0	2,11 3	2,06 7	2,00 4	1,70 6
	P_{Idc}	1,22 9	1,49 1	1,71 0	1,89 6	1,94 4	1,87 2	1,82 5	1,73 3
	P_{UIdc}	1,31 3	1,57 6	1,79 4	1,98 6	2,02 7	1,96 7	1,91 3	1,71 9
100k	P_{Udc}	1,12 1	1,36 2	1,54 5	1,71 3	1,69 5	1,65 6	1,56 3	1,36 4
	P_{Idc}	1,34 6	1,66 4	1,90 4	1,96 0	1,93 2	1,98 8	1,93 2	1,63 8
	P_{UIdc}	1,22 8	1,50 5	1,71 5	1,83 3	1,81 0	1,81 5	1,73 8	1,49 5



Фиг. 7. Резултати за различни капацитети

Трябва да се отбележи, че във всички експерименти използваният токоизправителен мост се счита за идеален. В таблица VIII са дадени резултатите от предварителните експерименти по отношение на токоизправителния мост. Експериментите са направени с измервателна верига VA-VA на честота 113 Hz с инерционна маса

1,13 g, като стойностите на променливото напрежение и ток (U_{RMS} и I_{RMS}) са в RMS формат.

Таблица VIII. ПРЕДВАРИТЕЛНИ РЕЗУЛТАТИ С ИЗПРАВИТЕЛЕН МОСТ

Loa d, Ω	U_{RM} [V]	I_{RMS} [mA]	P_U [mW]	P_I [mW]	P_{UI} [mW]	U_{DC} [V]	I_{DC} [mA]	P_U [mW]	P_I [mW]	P_{UI} [mW]
390	1,30 2	4	4,34 668	6,24	5,20 8	0,17 1	0,34 3	0,07 498	0,04 588	0,05 865
1000	1,45 7	3,92	2,12 285	15,3 664	5,71 144	0,33 4	0,33 1	0,11 156	0,10 956	0,11 055
2400	1,87 2	3,68	1,46 016	32,5 018	6,88 896	0,79 1	0,30 1	0,26 07	0,21 744	0,23 809
5100	2,37	3,46	1,10 135	61,0 552	8,20 02	1,38 2	0,27 5	0,37 449	0,38 569	0,38 005
10000	3,18	3,1	1,01 124	96,1	9,85 8	2,34	0,23 2	0,54 756	0,53 824	0,54 288
12400	3,47	2,92	0,97 104	105, 727	10,1 324	2,69	0,21 4	0,58 356	0,56 787	0,57 566
24000	4,34	2,38	0,78 482	135, 946	10,3 292	3,89	0,16 2	0,63 05	0,62 986	0,63 018
51000	5,15	1,62	0,52 005	133, 844	8,34 3	5,35	0,10 1	0,56 123	0,52 025	0,54 035
75000	5,47	1,22	0,39 895	111, 63	6,67 34	5,99	0,07 3	0,47 84	0,39 968	0,43 727
100000	5,58	1,14	0,31 136	129, 96	6,36 12	6,17	0,06 6	0,38 069	0,43 56	0,40 722

Коригираните стойности са съответно обозначени като U_{DC} и I_{DC} в таблица VIII. Интересната част от показаната таблица не е, че променливата мощност, изчислена спрямо променливото напрежение U_{RMS} , е донякъде най-близка до резултатите от коригираните параметри, а фактът, че след като стойността на съпротивлението на натоварване се увеличи над най-ефективната стойност (за получаване на максимална обем електрическа енергия), стойностите на изправеното напрежение стават по-големи от съответните стойности за измерените RMS стойности на напрежението (когато електрическият товар R_L е над 24 k Ω).

Влияние на мостовия изправител

Може да се приеме, че горепосоченият ефект е резултат от напреженов умножител, базиран на диодно-кондензаторна ве-



рига, който се създава с помощта на изходния капацитет и диодите на токоизправителния мост. Самите диоди имат свой собствен капацитет – дифузионен капацитет (C_D), когато са в права поляризация и преходен капацитет (C_T), когато са обратно поляризирани. Преходният капацитет зависи от стойността на приложеното напрежение в обратна посока, а дифузионният капацитет е право пропорционален на постоянния ток през диода и двата капацитета могат да бъдат представени като паралелно свързан кондензатор към диодната структура. Факт е, че напреженията върху мостовите диоди са с „променливи“ величини в процеса на работа на пиезоелектрическия харвестер, което допълнително усложнява описанието на поведението на веригата. Следователно и двата капацитета не са постоянни, когато съответните поляризации се прилагат към диодите, но техните стойности трябва да варират в зависимост от големината и формата на сигнала от пиезоелектрическия харвестер и честотата на външните механични усилия.

Нелинейността на диодите също играе своята роля, както може да се види от таблица VIII за изправените напрежения за първите три електрически товара (390Ω , $1 \text{ k}\Omega$ и $2,4 \text{ k}\Omega$). Променливите напрежения за тези товари едва успяват да отпушат диодите и получените стойности на мощността са по-малки от останалите.

Капацитетът на диодите и нелинейността на диодите допълнително намаляват наличното количество електрическа енергия, която може да бъде събрана от вибрационния пиезоелектричен ЕН. Това е особено очевидно, когато напреженията, получаващи от пиезоелектричния елемент, са относително малки и сравними с отпушващите напрежения на диодите. Въпреки това токоизправителя е необходим за правилна оценка на наличния енергиен обем, който може да бъде събран от пиезоелектричния ЕН, тъй като оценката чрез променливите

напрежения и токове може да доведе до непредвидени по-големи грешки (таблица III и таблица VIII). Токоизправителните мостове се използват в налични в търговската мрежа приложения за събиране на енергия [11] (LTC3588), които са напълно оптимизирани за енергийни източници с висок изходен импеданс, като например пиезоелектрични преобразуватели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Количеството електрическа енергия, налична за събиране от ЕН устройства, е тясно свързана с присъщата им специфика, като в случая на вибрационни пиезоелектрични ЕН, тяхната относително ниска токова плътност е тяхната слабост. Но това не е от толкова голямо значение, когато се използват за захранване на товари с висок импеданс.

По-големият проблем е точната оценка на възможностите на ЕН системата, която е тясно свързана с нейната изходна схема. Изследването за най-подходящата изходна конфигурация показва, че има необходимост от токоизправителна верига, тъй като променливите стойности могат да доведат до огромна грешка при оценката на мощността, която може да бъде събрана. Причината е наличието на реактивна мощност, която изобщо не е използвана. Реактивната част се дължи на присъщия капацитет на пиезоелектричния активен елемент и капацитета на електрическия товар. Веригата на токоизправителя ще предотврати отделянето на реактивната мощност върху електрическия товар и следователно ще позволи да се измери реалната изходна мощност на пиезоелектрическия вибрационен харвестер.

Също така, изследването показва, че изходният капацитет може да повлияе на обема на получената енергия, което изисква допълнително проучване. Влиянието на променливите съпротивления и капацитети на диодите от токоизправителния мост



трябва да намали получаваната енергия, но не драстично. Проблемът е да се настрои пиезоелектрическият харвестер да работи на такива честоти, че получените напрежения да са в състояние напълно да отпушат диодите или изходните капацитети да бъдат подбрани за максимална ефективност.

Изходните електрически товари трябва да бъдат избрани така, че да осигурят максимална изходна мощност за честотния диапазон, в който работят вибрационните пиезоелектрически харвестери.

БЛАГОДАРНОСТИ

Тази публикация е финансирана от Проект BG05M2OP001- 1.002-0023, Център по компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“ по Оперативна програма 2014 – 2020, съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейските структурни и инвестиционни фондове.

ЛИТЕРАТУРА

- [1.] F. Yildiz, *Potential Ambient Energy-Harvesting Sources and Techniques*, The Journal of Technology Studies, 2009, pp. 40-48, Published on 1 October 2009, DOI:10.21061/jots.v35i1.a.6.
- [2.] S. Zeadally, F. K. Shaikh, A. Talpur, Q. Z. Sheng, *Design architectures for energy harvesting in the Internet of Things*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 128, 109901, doi:10.1016/j.rser.2020.109901
- [3.] Inspire Clean Energy Blog, Web: <https://www.inspirecleanenergy.com/blog/c>

lean-energy-101/6-alternative-energy-sources

- [4.] S. Nurettin, K. Muammer, *Comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting*. Nano energy, Vol. 80, February 2021, DOI: 10.1016/j.nanoen.2020.105567.
- [5.] H. Wang, A. Jasim, X. Chen, *Energy Harvesting Technologies in Roadway and Bridge for Different Applications – A Comprehensive Review*. Applied Energy, Vol. 212 (2018), pp. 1083–1094, ISSN: 0306-2619.
- [6.] Ch. Sun, G. Shang, H. Wang, *On Piezoelectric Energy Harvesting from Human Motion*. Journal of Power and Energy Engineering, January 2019, 07 (01), pp. 155-164, DOI:10.4236/jpee.2019.71008.
- [7.] A. Erturk, *Electromechanical Modeling of Piezoelectric Energy Harvesters*, PhD dissertation thesis in Engineering Mechanics, Virginia Polytechnic Institute and State University, 20 November 2009.
- [8.] H. Xiong, *Piezoelectric Energy Harvesting for Public Roadways*. PhD dissertation thesis in Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, December 2014.
- [9.] M. F. Lumentut, I. M. Howard, *Electromechanical Finite Element Modeling for Dynamic Analysis of a Cantilevered Piezoelectric Energy Harvester with Tip Mass Offset under Base Excitations*. Smart Materials and Structures, 23(9), 2014, 095037, DOI:10.1088/0964-1726/23/9/095037.
- [10.] MIDE Technology, Web: <https://piezo.com/collections/piezoelectric-energy-harvesters>
- [11.] Analog Devices, Web: <https://www.analog.com/en/products/ltc3588-1.html>



СИСТЕМА ЗА БЕЗКОНТАКТЕН ЗАРЯД НА ЕЛЕКТРОМОБИЛИ С ДОПЪЛНИТЕЛЕН РЕЗОНАНСЕН КРЪГ

CONTACTLESS CHARGING SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLES WITH RESONANT CIRCUIT

Nikolay Madzharov

Technical University of Gabrovo, BG

Desislav Iliev

Technical University of Gabrovo, BG

Egnar Ozdikikiler

Istanbul Technical University, TR

Abstract

This paper presents method to solve the major problem with contactless charging system for electric vehicles-increasing distance between the transmitting coil (installed below the roadway) and the receiving coil (installed in the electric car), while system efficiency remains high. System for contactless charging of electric vehicles has been developed and researched, in which a resonant coil is introduced, serving to match the system performance. The distance can be significantly increased and the efficiency of whole system improved. The main electrical and electromagnetic parameters are presented. Using specialized software and data from the developed system, the distribution of the magnetic field is visually demonstrated. The main values at different distances between the transmitter coil, resonant coil and receiver coil are presented.

Keywords: Wireless Power Transfer, Contactless Charging System, Magnetic Resonance, Efficiency

ВЪВЕДЕНИЕ

Съществуват много видове методи за безконтактен пренос на енергия, като основните са: капацитивен, микровълнов, оптичен и индуктивен. Технически най-целесъобразен при зареждането на електромобили е индуктивният метод и в частност индуктивно-резонансният за прехвърляне на електрическа енергия на разстояние по-голямо от $\frac{1}{4}$ от диаметъра на предавателната намотка [1-3]. Едно от основните му предимства е, че енергия се прехвърля само тогава, когато имаме активна приемна страна, за разлика от микровълновия и оптичния метод, при който енергията се предава постоянно от източника и се излъчва в про-

странството, без значение дали е налице приемна част.

На фиг.1 са представени основните геометрични параметри при безконтактно зареждане на електромобили, имащи отношение към получаване приемливи технико-експлоатационни параметри.

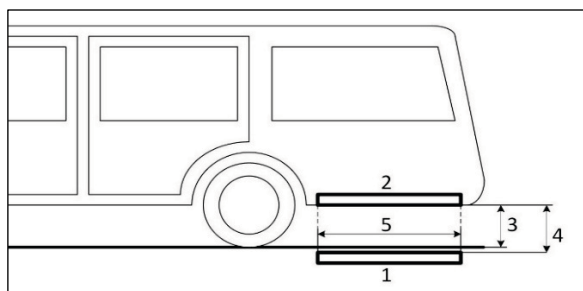
Основните проблеми, които възникват при реализирането на този метод са:

- при увеличаване на разстоянието между предавателната и приемна намотка зареждане на автомобили над $\frac{1}{4}$ от диаметъра на намотките (D), коефициентът на магнитна връзка (k) между тях намалява под 0.2 и общият КПД на системата спада. Това разстояние е индивидуално за всеки различен



автомобил - зависещо от производител, марка, модел на електромобила и др.

- също така това разстояние зависи и от моментното натоварване на автомобила, дори и от амортизацията на носещите елементи, от окачването по време на експлоатация на автомобила, моментното състояние на гумите и други експлоатационни фактори.

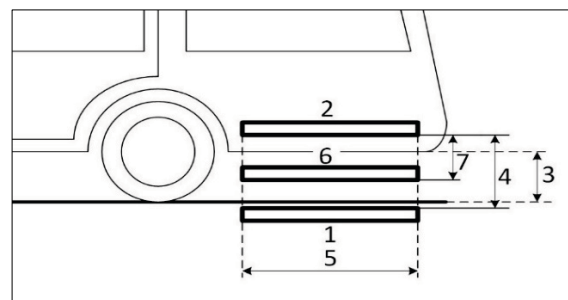


Фиг. 1. Електроавтомобил по време на зареждане: 1- предавателна намотка; 2-приемна намотка; 3- клиренс на автомобила; 4- разстояние между предавателната и приемната намотка (d) и 5- диаметър на предавателната и приемната намотка (D).

ИЗЛОЖЕНИЕ

Значително подобрение на системата за безконтактен пренос на енергия при заряд на електромобили (и намаляване на изложените по-горе недостатъци) може да се постигне, като се въведе допълнителен резонансен кръг, който да се монтира в електромобила (позиция 6 от Фиг. 2). Чрез промяна на разстоянието (7), на което той се позиционира от електромобила и пътната настилка, може да се постигне по-добро съгласуване и от там да се осъществи ефективно прехвърляне на електрическа енергия при удовлетворителен КПД и увеличено разстояние между предавателната и приемна част на безконтактната система. Допълнителната намотка е със значително по-малка маса и габарити поради липсата на магнитопровод и екрани. Въвеждането на допълнителната намотка и възможността за

лесното ѝ позициониране във вертикална посока решава един много важен проблем, свързан с настройването на цялата система при различни разстояния между електромобила и пътното платно.



Фиг. 2. Електроавтомобил по време на зареждане с въведен допълнителен резонансен кръг: 1- предавателна намотка; 2-приемна намотка; 3- клиренс на автомобила; 4- разстояние между предавателната и приемната намотка (d); 5- диаметър на предавателната, приемната намотка и допълнителния резонансен кръг (D); 6- допълнителен резонансен кръг и 7- разстояние между приемната намотка и допълнителния резонансен кръг.

Изчисляването на параметрите на този вид системи е трудно, защото коефициента на магнитна връзка (k) между предавателната и приемната намотка е много малък и практически е нула. Поради тази причина не могат да се прилагат Т-образни заместващи схеми.

Целесъобразно е да се работи с матрици със Z- параметри.

За изчисляване на индуктивностите на системата се използва алгоритъм (1) [4].

$$[L] = \begin{bmatrix} L_1 & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_2 & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

където:

L- индуктивност на системата;

L₁- собствена индуктивност на предавателната намотка;



L_2 - индуктивност на резонансния кръг;
 L_3 - индуктивност на приемната намотка;
 $L_{12} = L_{21}$ - взаимна индуктивност между предавателната намотка и резонансния кръг;
 $L_{13} = L_{31}$ - взаимна индуктивност между предавателната и приемната намотка;
 $L_{23} = L_{32}$ - взаимна индуктивност между резонансния кръг и приемната намотка.

За изчисляване на ефективността на този вид система, но без въведен резонансен кръг, се използва следната формула (2):

$$\eta_{max} = \frac{(\omega_0 L_m)^2}{(\sqrt{r_1 r_2} + \sqrt{r_1 r_2 + (\omega_0 L_m)^2})^2} \quad (2)$$

където:

η_{max} - максималната ефективност на системата;

ω_0 - резонансна честота на системата;

L_m - взаимна индуктивност на системата;

r_1 - съпротивление на предавателната амотка;

r_2 - съпротивление на приемната намотка.

При изчисляване на ефективността на система с въведени N - брой резонансни кръгове се използва метод за изчисления, при който резонансните кръгове се разглеждат като филтри (Bandpass filter theory). На базата на тази теория ефективността на системата може да се изчисли с помощта на (3) [5]:

$$\eta_{max} = \left(1 - \frac{r_n}{R_{load}}\right) \left(1 - \frac{\sum_{1 \leq i \leq N} r_i^{-1}}{R_s}\right) \quad (3)$$

където:

η_{max} - максималната ефективност на системата;

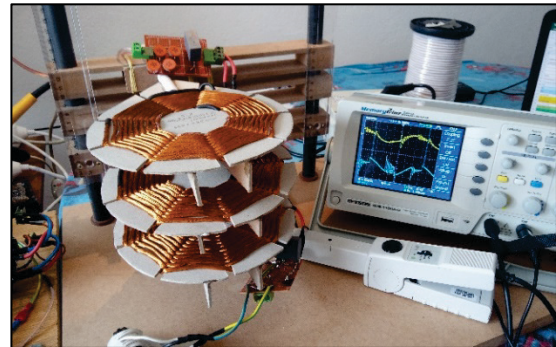
r_n - съпротивление на последния резонансен кръг;

R_{load} - съпротивление на товара;

r_i - съпротивление на i -тия резонансен кръг;

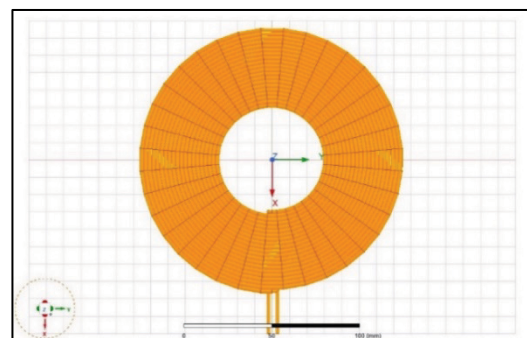
R_s - съпротивление на източника.

За изследване и доказване ефективността на предложения метод за безконтактно зареждане на превозни средства е разработена система за заряд на електромобили, работеща на индуктивно-резонансен принцип в мащаб 1:4 спрямо реалните размери (Фиг. 3).



Фиг. 3. Безконтактно предаване на енергия с резонансен кръг

За приемна и предавателна намотка, както и за пасивен резонансен кръг са използвани планарни намотки (Фиг. 4) със следните геометрични параметри: вътрешен диаметър 60 mm, външен диаметър 150 mm, 20 навивки литцентрат от 120 единични проводника с диаметър 0,20 mm (сечение 4 mm²). Индуктивността на всяка от тях е 38,3 μH. Работната честота на системата е от 22 до 33 kHz.



Фиг. 4. Външен вид на индуктивностите, използвани в макета.



При външен диаметър на намотката от 15 cm и мащаб 1:4 за реален размер на намотките в електромобила (приемната намотка и пасивния резонансен кръг) се получава диаметър 60 cm. Така те могат да бъдат вградени в подовото пространство на превозното средство.

След позициониране на превозното средство над предавателната намотка, пасивния резонансен кръг може да се спусне във вертикална посока и да се приближи към пътната настилка (респективно предавателната намотка) до момента в който се получи желаното или максимално изходно напрежение. По този начин се получава съгласуване на цялата система и се повишава ефективността на прехвърлянето на енергия и коефициента на полезно действие.

Изследването е извършено за четири просвета на електромобила:

- 56 cm (отговарящо на просвета на голям автомобил с висока проходимост или камион) - еквивалентно на 140 mm разстояние между предавателната и приемната намотка на макета;

- 48 cm (отговарящо на просвета на голям автомобил с висока проходимост с максимално натоварване)- еквивалентно на 120 mm разстояние между предавателната и приемната намотка на макета;

- 40 cm (отговарящо на просвета на автомобил от среден и висок клас тип SUV) - еквивалентно на 100 mm разстояние между предавателната и приемната намотка на макета;

- 32 cm (отговарящо на максималния просвет на превозно средство от среден и по-нисък клас тип SUV)- еквивалентно на 80 mm разстояние между предавателната и приемната намотка на макета.

За всеки от четирите варианта са извършени практически изследвания с разработената система при девет различни разстоя-

ния между резонансния кръг и предавателната намотка, имащи отношение към реалното позициониране на електромобила над предавателния модул.

За сравнение и по-лесно обобщаване на резултатите, разстоянията между предавателната намотка (TX), резонансния кръг (RC) и приемната намотка (RX) е нормализирано и е представено в проценти. В табл. 1 е представено нормализираното разстояние (TX-RX) между предавателната (TX) и приемната намотка (RX), прието за 100% и нормализираното разстояние (TX-RC) между предавателната намотка и резонансния кръг (RC), изменящо се в границите от 25% до 75%.

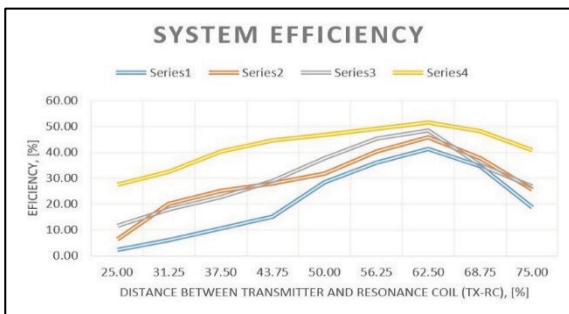
Табл. 1 Нормализирано разстояние и реално разстояние TX-RX и TX-RC на макета.

TX-RX	TX-RC								
	25.00%	31.25%	37.50%	43.75%	50.00%	56.25%	62.50%	68.75%	75.00%
140 mm	35.00mm	43.75mm	52.50 mm	61.25 mm	70.00 mm	78.75 mm	87.50 mm	96.25 mm	105.00 mm
120 mm	30.00 mm	37.50 mm	45.00 mm	52.50 mm	60.00 mm	67.59 mm	75.00 mm	82.50 mm	90.00 mm
100 mm	25.0 mm	31.25 mm	37.50 mm	43.75 mm	50.00 m	56.25 mm	62.50 mm	68.75 mm	75.00 mm
80 mm	20.00 mm	25.00 mm	30.00 mm	35.00 mm	40.00 mm	45.00 mm	50.00 mm	55.00 mm	60.00 mm

При последващо намаление или увеличаване на разстоянието TX-RC, КПД на системата спада много, като едновременно с това се увеличава тока през инвертора и предавателната намотка до много големи стойности, които са над допустимите за системата.

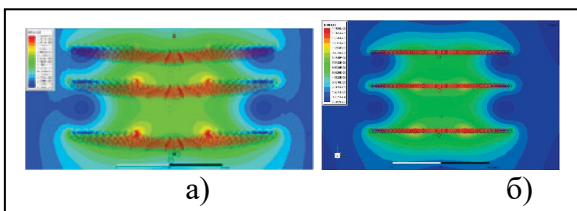
РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО

Резултатите от изследването са представени в графичен вид (фиг. 5). Ясно се вижда, че при разположение на резонансния кръг на 62,50 % отстояние от предавателната намотка и в четирите случая КПД е най-голямо, като достига 51,63% при най-малкото разстояние между предавателната и приемната намотка (80 mm) и спада до 41.45% при най-голямото разстояние от 140 mm.



Фиг. 5. Ефективност на системата при четирите различни разстояния между предавателната и приемната намотка (TX- RX): series1-140 mm; series2- 120 mm; series3 – 100 mm и series4- 80 mm.

Проектирания и разработен лабораторен макет е анализиран със специализиран софтуер. След въвеждане на реалните данни за токовете и напреженията, е симулирано разпределението на магнитното поле в системата (фиг. 6.).



Фиг.6. Разпределение на магнитния поток в системата: а)- при разстояние TX-RX 80 mm и б)- при разстояние TX-RX 140 mm

Вижда се, че при разстояние 80 mm между предавателната и приемната намотка и 62,5% (50 mm) отстояние между предавателната намотка и резонансния кръг магнитното поле е 4.7 mT (фиг. 6. а). При разстояние 140 mm между предавателната и приемната намотка и 65.2% (87.5 mm) разстояние между предавателната намотка и резонансния кръг магнитното поле е 3,2 mT (Фиг. 6.б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От представените резултати може да се направи извода, че чрез въвеждане на допълнителен резонансен кръг в системата за безконтактно зареждане на автомобили, който се позиционира по височина, може да се увеличи разстоянието между предавателната и приемни части и повиши общия КПД.

С този метод е възможно разстоянието на предаване на енергия да се увеличи над физически възможното с две намотки - $d/4$ и същевременно да се компенсира разликата във височината на различните превозни средства.

В бъдеще изследванията ще продължат в насока увеличаване на КПД на системата за безконтактно зареждане на автомобили, като се разработят и изследват варианти с различни размери на предавателната и приемна част, магнитни вериги, концентратори и антиконцентратори на магнитно поле и стойности на работната честота.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. Kurs, R. Moffatt, J.D. Joannopoulos, A. Karalis, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances" in Science, Vol. 317, 6 July 2007. DOI:10.1126/science.1143254M.
- [2] Budhia, G. Covic and J. Boys," A New IPT Magnetic Coupler for Electric Vehicle Charging Systems" in IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 7-10 Nov. 2010.DOI:10.1109/IECON.2010.567530
- [3] N. Madzharov, "Contactless power transmitters for electric energy", Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria. 2017, conference on advances in steel structures, vol. II, 2002, p. 1111-1118.
- [4] T. Imura, "Wireless Power Transfer Using Magnetic and Electric Resonance Coupling Techniques", Springer, 2020, ISBN 978-981-15-4579-5
- [5] N. Shinohara, "Wireless Power Transfer-Theory, technology and applications", The Institution of Engineering and Technology, London, UK, 2018, ISBN 978-1-78561-347-0



ИЗСЛЕДВАНЕ НА АДСОРБЦИОННОТО ПОВЕДЕНИЕ НА КАТИОННИ ПОВЪРХНОСТАКТИВНИ ВЕЩЕСТВА ВЪРХУ СИЛИЦИЕВИ ПЛАСТИНИ С ПОМОЩТА НА ОБРАЗНА ЕЛИПСОМЕТРИЯ

INVESTIGATION OF CATIONIC SURFACTANTS ADSORPTION BEHAVIOUR ON SILICON WAFERS USING IMAGING ELLIPSOmetry

**Mihail Georgiev, Boris Konstantinov, Krastanka Marinova,
Jordan Petkov, Krassimir Danov**

*Department of Chemical and Pharmaceutical Engineering, Faculty of Chemistry and Pharmacy,
Sofia University, Sofia 1164, Bulgaria*

Abstract

The research paper explores the adsorption properties of cationic surfactants on silicon wafers through imaging ellipsometry. The objective of this research is to shed light on the layer structures formed by cationic surfactants, specifically those based on dimethyl ammonium chloride, on silicon wafers. The study involved the deposition of three distinct cationic surfactants on the wafer's surface, followed by the measurement of the adsorption layers formed. The findings reveal the creation of thin, smooth, and irregular adsorption layers. Interestingly, no correlation was found between the thickness of the adsorption layer and the surfactant tail's chain length. The research underlines the significant role which the imaging ellipsometry can have for studying surfactants' adsorption properties on surfaces, contributing to their optimal usage in various fields.

Keywords: Imaging Ellipsometry, Cationic surfactants, Adsorption layer structure, Solid surface.

1. INTRODUCTION

Surfactants are widely used in many industries as they can modify the surface properties of materials, such as wetting, adhesion, and lubrication [1,2,3]. Among these, cationic surfactants have been particularly useful as bacteriocides in various applications, including the food industry and medical devices [4]. Their effectiveness as bacteriocides is directly related to their adsorption behaviour on surfaces, which boosts the interaction between the surfactant and the bacteria. Understanding the adsorption behaviour of cationic surfactants on surfaces is crucial for optimising their use as bacteriocides [5,6].

In this paper, we present a detailed investigation of the adsorption behaviour of cationic surfactants on silicon wafers using

imaging ellipsometry. This advanced ellipsometry device enables measurements of thin films and surfaces with good spatial resolution. Instead of using a single measurement spot, imaging ellipsometry scans a focused beam of light across the sample and collects data at each point (pixel) to build a two-dimensional image. This allows for detailed characterisation of variations in film thickness, refractive index, and other optical properties across the sample surface [7]. Imaging ellipsometry can be used to study a wide range of materials and systems, including thin polymer films, biological tissues, and nanomaterials.

This study aims to provide insights into the layer structure of cationic surfactants based on dimethyl ammonium chloride on silicon wafers by using imaging ellipsometry

to investigate the adsorption behaviour. We deposit three different cationic surfactants onto the silicon wafer surface and measure the resulting adsorption layers.

Using imaging ellipsometry we have demonstrated the formation of a thin, smooth, nonuniform adsorption layer of cationic surfactants without direct correlation between the surfactant tail length and the adsorption layer's thickness. Well-defined stratification layers during the evaporation of the solution on the surface has been observed in one of the systems.

In conclusion, it has been demonstrated that imaging ellipsometry is a powerful tool for characterising the adsorption behaviour of cationic surfactants on silicon wafers, which can be further used to optimise their use in various applications.

2. MATERIALS

Three cationic surfactants were employed, namely CatS-2C8 (Diocetyl dimethyl ammonium chloride), CatS-2C10 (Didecyl dimethyl ammonium chloride), and CatS-C8C10 (a combination of Diocetyl dimethyl ammonium chloride, Didecyl dimethyl ammonium chloride, and Decyl Octyl dimethyl ammonium chloride), as shown in Figure 1). The solutions were prepared using deionised water generated by the Elix 5 purification system (Millipore, USA).

3. METHOD AND EXPERIMENTAL PROCEDURE

Ellipsometry is an optical method employed to determine the ratio of the complex-amplitude reflection coefficients of *p*- and *s*- polarised lights reflected from a surface. The ellipsometric parameters Ψ and Δ , as shown in equation (1), describe this ratio. After measuring these two parameters, a surface's refractive index and thickness can be determined using a well-established physical model [8].

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan(\psi) e^{-i\Delta} \quad (1)$$

It is sensitive to single- and multi-layer ultrathin films, ranging from mono-atomic or monomolecular layers up to thicknesses of several microns. To determine the full dynamic range of ellipsometric parameters ($0 \leq \psi \leq \pi/2$, $0 \leq \Delta \leq 2\pi$) for characterising the surface of a thin film, a rotation compensator method (RCE) is used (see Fig.2). Also, this option allows us very quickly to build a 3D map of the surface where each pixel has its own Ψ and Δ . And subject to an appropriate physical model, these values are calculated in terms of layer thickness.

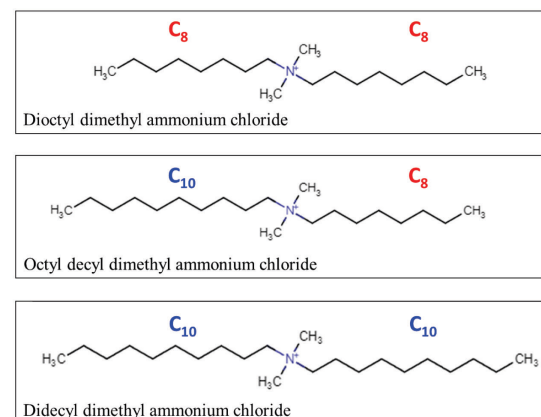


Fig. 1. Structural formulas of the used cationic surfactants.

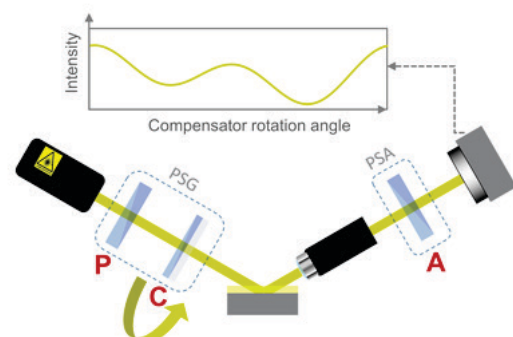


Fig. 2. Principle of rotating compensator configuration used in imaging ellipsometry.



To accomplish this task, we used a NanoFilm EP4 imaging ellipsometry system (Accurion GmbH, Göttingen) equipped with a focus scanner (10x magnification). The used substrate was Si/SiO₂, with a thickness of the SiO₂ layer equal to 234 nm. Figure 3 displays the experimental results for the determined thickness.

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \quad (2)$$

The analysis of the optical parameters Ψ and Δ in terms of deposited layer thickness requires the determination of the refractive index of the layer. In this study, the deposited surfactant layer is characterised by the Cauchy equation (eq. 2) for a transparent layer, which is an empirical relationship between the refractive index, n , and the wavelength, λ .

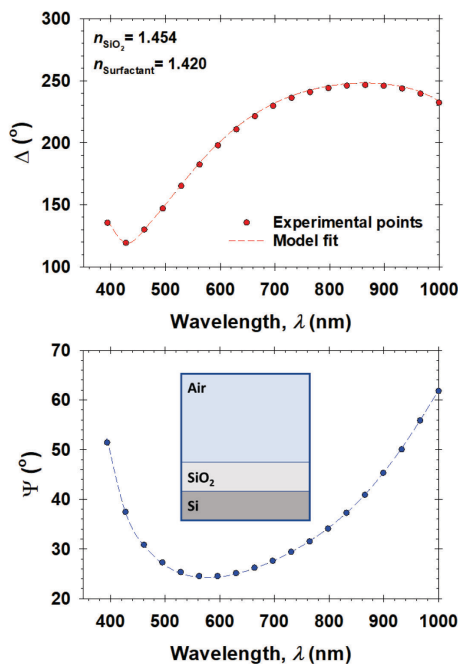


Fig. 3. Measured Δ and Ψ values as a function of the wavelength at an angle of incidence = 60° for the bare Si/SiO₂ surface. The experimental points are taken at an ellipsometric nulling condition in four-zone measurement to use the maximum accuracy of the technique. The picture represents an illustration of the physical model used to calculate the thickness of the SiO₂ layer.

The mathematical model that fits the objective physical reality quite well includes a substrate of Si, above it an atomically smooth layer of SiO₂ on which there is a molecularly smooth layer of surfactant, and the environment is air, as shown in the picture in Fig. 3. Defining the thickness of the SiO₂ allows us to upgrade the model with an additional layer, those of the adsorbed surfactant, and continue to use the one-layer ellipsometry task. This means that all deviations in the Δ and Ψ will be attributed to the thickness of the surfactant layer. A refractive index value of 1.42 was used for all calculations pertaining to the surfactant layer.

The treatment protocol involves using kimwipes soaked in a 1 ml solution to perform five circular wiping on a bare silicon wafer. Following the wiping, the surface is coated with small droplets of the solution, which quickly evaporate.

4. RESULTS AND DISCUSSION

Adsorption layer from CatS-C8C10

In Figure 4A, the results of imaging ellipsometry are presented, displaying the surfactant layer remaining on the surface of a silicon wafer after treatment with a solution of CatS-C8C10 at a concentration of 0.5 wt%. Notably, the layer that forms from surfactant evaporation increases in thickness from the top to the bottom of the wafer. The residual droplet area is visible as a yellow region in the image and is observable to the naked eye, as shown in Figure 5A. Dense stratification layers form around these residual droplets, and the thickness of the layer increases towards the center of the droplet due to increasing concentration from solution evaporation. The first layer measured has a thickness of 3.3 nm, and the first five layers exhibit a slope of 3.24 nm, indicating they are a stack of lamellar sheets. Linear regression is observed even after the fifth layer, although with a different slope equal to 2.14 nm (see

Fig. 4C). Possible explanations for this observation suggest that the first five layers are formed mainly by Didecyl surfactant molecules due to their higher surface activity than Dioctyl surfactants. Due to their shorter chain length, Dioctyl monomers may form the upper layers with a thinner step. Alternatively, the upper layer may contain a mixture of Didecyl and Dioctyl monomers, based on possible tilting in the chains of the upper layers due to the exhaustion of larger chain-length surfactants for the formation of the first five layers.

Adsorption layer from CatS-2C8

The images presented in Figure 5, obtained using imaging ellipsometry, show the surface topography of a silicon wafer treated with a 0.5 wt% solution of CatS-2C8. The first image (Fig. 5A) displays a section with a smooth and dense layer on the surface with a thickness of approximately 5 nm. The next two images (Figure 5B and 5C) reveal additional steps with a thickness of 5 nm each. The final layer, depicted in Figure 5C, consists of spherical aggregates with a thickness of roughly 20 nm. Notably, these aggregates are not visible to the naked eye but leave a visibly greasy surface, as shown in Fig. 7B. Collectively, these images provide insight into the surface structure of the silicon wafer after treatment with CatS-2C8 and suggest the presence of a spread adsorption layer.

Adsorption layer from CatS-2C10

In Figure 6, the imaging ellipsometry results illustrate the adsorption characteristics of CatS-2C10, the surfactant featuring two decyl tails per monomer. Away from the droplet evaporation regions, the adsorption layer appears to be non-dense, exhibiting a thickness of 2.5 nm, as evident from Figure 6A. In contrast, closer to the evaporated droplets, we observe a disordered formation of thick adsorption layers, displaying

thicknesses above 40 nm, as evident from Figures 6B and 6C.

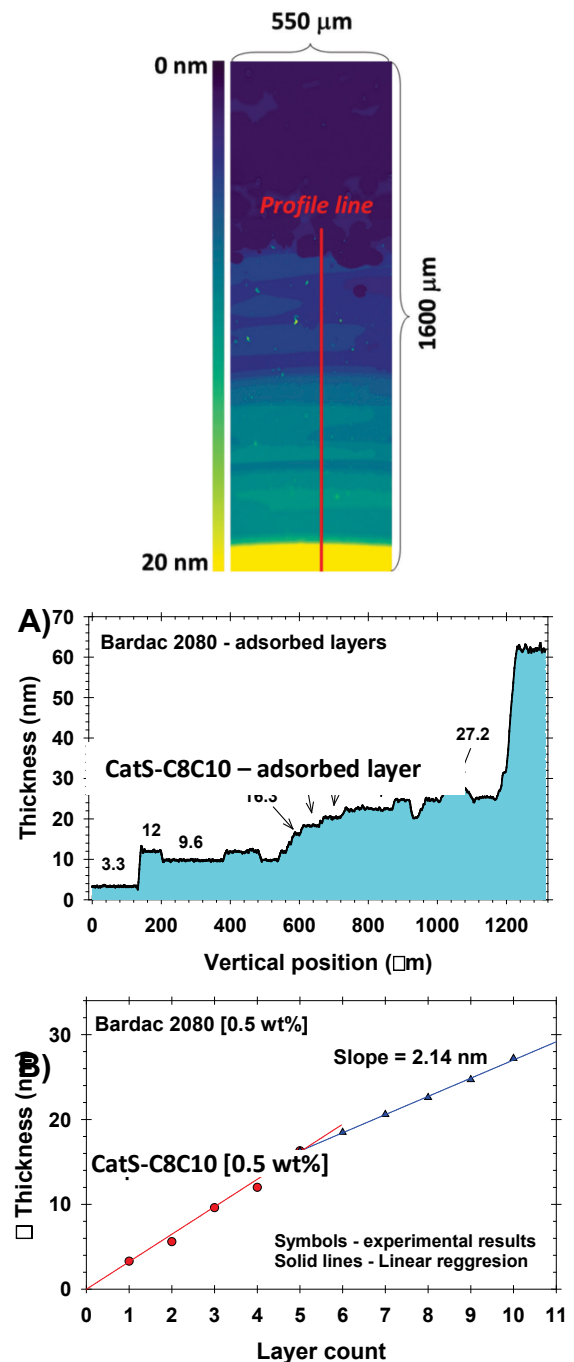


Fig. 4. Experimental results of 0.5% CatS-C8C10. A) Images obtained using imaging ellipsometry; B) Thickness of the adsorbed layer at the red profile line shown in A; C) arrangement of the sequence of thickness taken from the profile by their value.

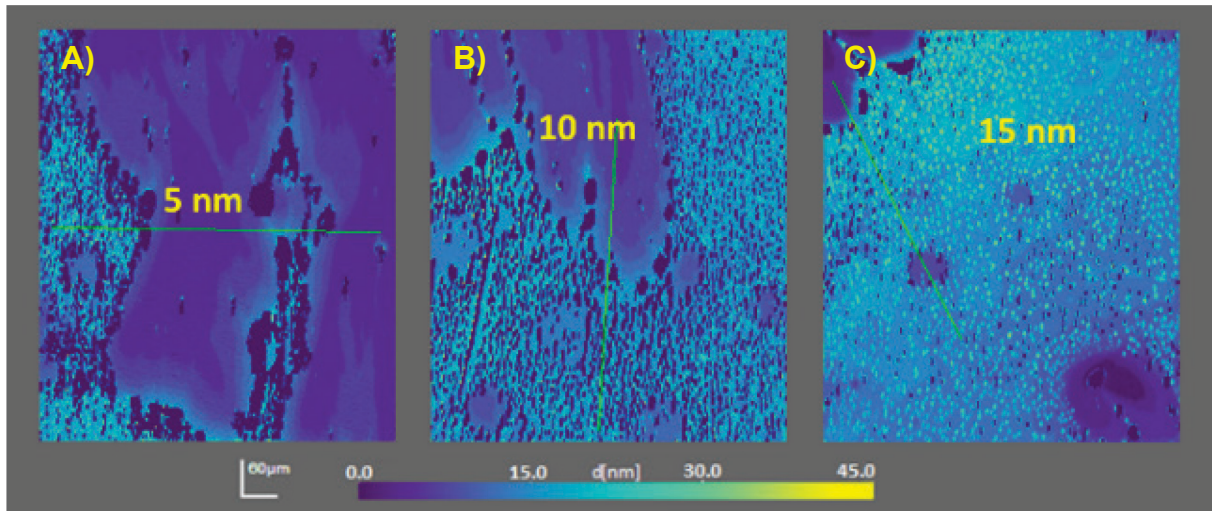


Fig. 5. Images obtained using imaging ellipsometry, which displays the surface topography of a silicon wafer after treatment with a solution of CatS-2C8 with a concentration of 0.5 wt%. All the images are representative of the most frequently observed structure.

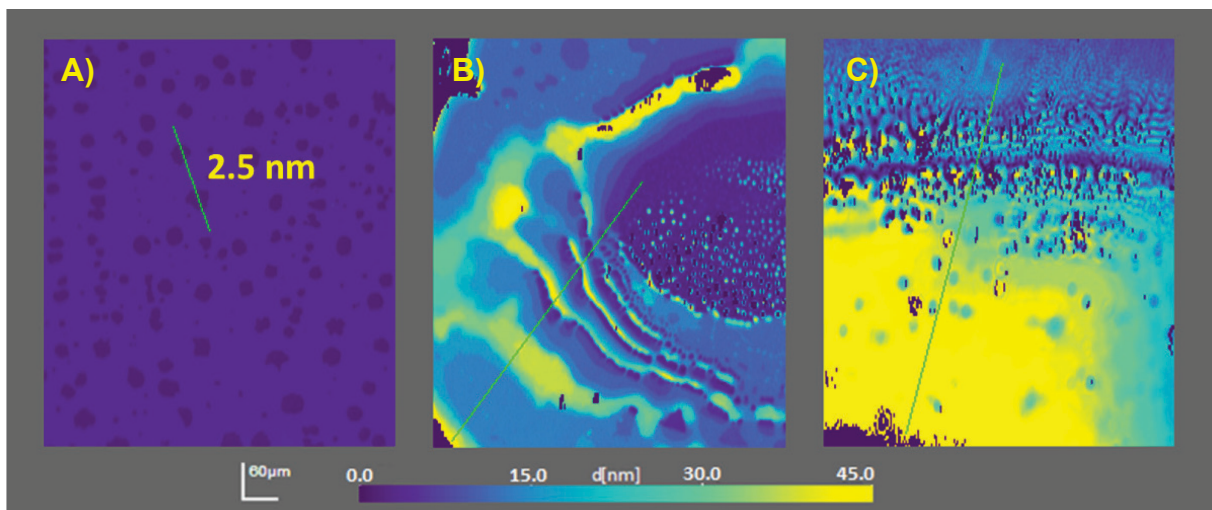


Fig. 6. Images obtained using imaging ellipsometry, which displays the surface topography of a silicon wafer after treatment with a solution of CatS-2C10 with a concentration of 0.5 wt%. All the images are representative of the most frequently observed structure.

Optical properties of the treated surface

When the silicon wafer is treated with the surfactant solution, the evaporation of the residual tiny droplets leaves visible spots on it. Representative images of the treated surface are illustrated in Fig.7. From the pictures, we can generally distinguish two regions: (i) transparent region, where the surface is optically clear, and (ii) oily regions, where even with the naked eye we can distinguish

the surfactant adsorption layers and the spots resulting from the evaporation. Actually, for all the investigated surfactants, the ellipsometry measurements of the optically clear transparent region show the presence of a thin adsorption layer. For the surfactant with two C8 chains (CatS-2C8), the thickness of this transparent layer is 5 nm, whereas, for the surfactant with two C10 chain lengths, this thickness is 2.5 nm.

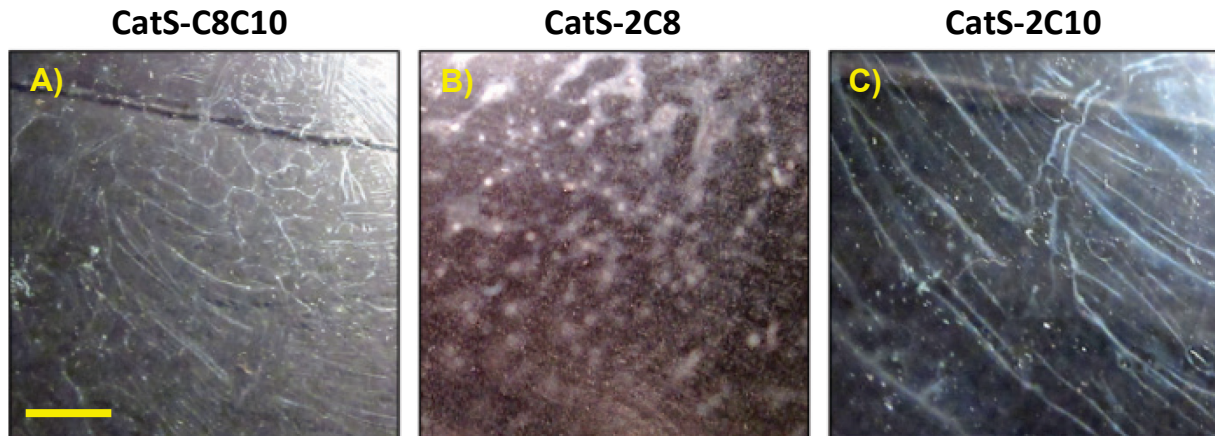


Fig. 7. Images of the silicon wafer surface treated with the different cationic surfactants, including A) CatS-C8C10; B) CatS-2C8; and C) CatS-2C10, where the scale bar is 1 cm.

5. CONCLUSIONS

The adsorption layers formed by three different surfactants (CatS-C8C10, CatS-2C8, and CatS-2C10) on a silicon wafer using imaging ellipsometry have been studied. The thickness and structure of these layers vary depending on the surfactant used. CatS-C8C10 forms a layer that increases in thickness from the top to the bottom of the wafer, with the first five layers being a stack of lamellar sheets. CatS-2C8 forms a dense and smooth layer approximately 5 nm thick, with spherical aggregates in the last layer. CatS-2C10 forms a non-dense adsorption layer away from droplet evaporation regions, while thick and disordered layers form close to these regions. The optical properties of the treated surface are also analysed, with a thin adsorption layer present in the transparent area for all three surfactants. Overall, the study provides valuable insights into the adsorption behaviour of these surfactants on silicon wafers, which could have significant implications in various industries and applications.

6. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors gratefully acknowledge the support from the Operational Programme “Science and Education for Smart Growth”, Bulgaria, project No. BG05M2OP001-1.002-0023

7. REFERENCES

- [1] C. Farias, F. Almeida, I. Silva et al. / *Electronic Journal of Biotechnology* 51 (2021) 28–39
- [2] M. Nedyalkov et al. / *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 354 (2010) 22–27
- [3] M.Y. Lim and J.R. Stokes / *Biotribology* 28 (2021) 100199
- [4] M.F. Khan et al. / *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 132 (2015) 216–224
- [5] R. Atkin et al. / *Advances in Colloid and Interface Science* 103 (2003) 219–304
- [6] P. Kélicheff and C. Contal / *Langmuir* 2019 35 (8), 3087-3107
- [7] *Ellipsometry and Polarized Light* by R.M.A. Azzam and N.M. Bashara
- [8] C.-J. Yu et al. / *Microelectronics Reliability* 55 (2015) 352–357 35.



ИЗСЛЕДВАНЕ РЕОЛОГИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА РАСТИТЕЛНИ МАСЛА

STUDY OF THE RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF VEGETABLE OILS

Hristo Nedev Hristov

Technical University of Gabrovo
christo@tugab.bg

Plamen Yordanov Bonev

Technical University of Gabrovo
eng.plamen.bonev@gmail.com

Georgy Slavchev Iliev

Technical University of Gabrovo
spigil@abv.bg

Abstract

One of the most important properties of liquids is their viscosity. It characterizes the magnitude of the internal friction when the individual layers of the liquid change relative to each other. A study was conducted to determine the effect of higher shear rates on the absolute viscosity of vegetable oil at various temperatures from 3 to 100 °C. The absolute viscosity of the vegetable oil was determined using the HAAKE MARS iQ Air, a rotating viscometer with a coaxial cylinder. Based on the rheograms, it is observed that the vegetable oil is most viscous at 100 °C and least viscous at 3 °C. The absolute viscosity of vegetable oil is reported to decrease with increasing temperature.

Keywords: *viscosity; rheograms.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Флуидите са вещества, които нямат собствена форма, а приемат формата на съда, в който са поставени.

Всяка материална среда била тя течност или газ, която притежава свойствата непрекъснатост и подвижност, се нарича флуид. Към флуидите спадат всички течности и газове. За разлика от твърдите тела флуидите променят значително своята форма, даже ако върху тях се прилагат незначителни по големина външни сили. Разликата в механичните свойства на флуидите и твърдите тела е в молекулния им стро-

еж. При твърдите тела силите на привличане между молекулите са значителни и те заемат точно определено положение в обема на тялото.

При деформация разстоянието между молекулите им се променя, но след премахване на външната сила то се възстановява.

При течностите междумолекулните и кохезионните сили са значително по-малки и под действие на външни сили молекулите променят местоположението си и след премахване на усилието заемат нови равновесни положения, без да могат да възстановяват първоначалната си форма.



Вискозитетът е свойството на течностите да устояват на силата, която ги кара да текат. Вискозитетът се разделя на два вида – динамичен и кинематичен. За разлика от кинематичния вискозитет, динамичният или абсолютният вискозитет не зависи от плътността на флуида, тъй като определя вътрешното триене във флуида. Абсолютният вискозитет често е свързан с напрежението на срязване, тоест напрежението, което е причинено от сила, действаща успоредно на напречното сечение на тяло или, в нашия случай, на течност.

Маслата и мазнините са основните материали за маргарин, олио за салата и други специализирани или пригодени продукти, които са се превърнали в важни съставки при приготвяне или преработка на храни.

Растителните масла имат широко приложение и като горива за енергийни котли и парогенератори, така и за двигатели с вътрешно горене.

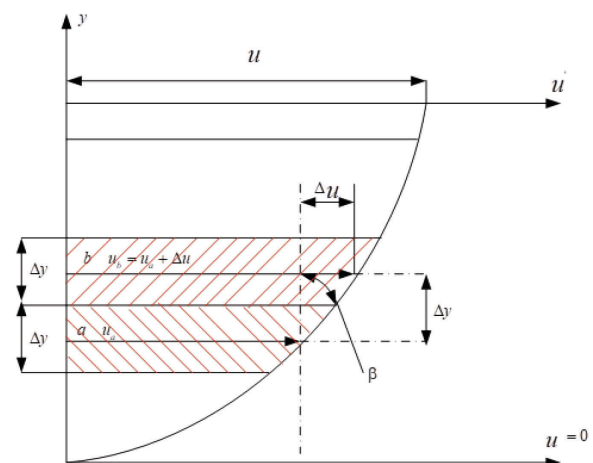
По-голямата част от хранителните масла и мазнини, произвеждани в световен мащаб годишно, се добиват от растителни източници и се наричат растителни масла. Най-разпространените в търговската мрежа растителни масла са рапица, царевича, маслини, слънчоглед и други. Съществуват и редица нови растителни масла като гроздови семена, оризови трици, макадамия и много други [1]. Реологичните характеристики на различните видове растителните масла се използват при изчисляване на хидродинамични и топлинни процеси в технологичните съоръжения.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Когато говорим за вискозитет, се разграничават два вида течности: нютонови и ненютонови. Вискозитетът на първите не зависи от силата, действаща върху тях. При последните ситуацията е по-сложна, тъй като в зависимост от големината на тази сила и начина, по който се прилага, те

стават повече или по-малко вискозни. Добър пример за ненютонова течност е сметаната. При нормални условия те са почти напълно без вискозни. Вискозитетът им не се променя, дори ако се приложи малко сила към тях, като например бавното им разбъркване с лъжица. Вискозитет който се определя от вътрешното триене в течността се нарича динамичен вискозитет, означава се η единицата е Паскал в секунда Pas.

Вискозитета на течностите се променя при изменение на температурата и налягането им $\eta = f(T, p)$. Колкото е по-висока температурата на течността, толкова по-малък е вискозитета и.



Фиг. 1. Скоростен профил на флуидно течение

За по-ясна представа за вътрешното триене бихме могли да я получим по следния начин. Течност се намира между две пластини фигура 1, при което долната е неподвижна, а горната подвижна и се движи в своята равнина с някаква скорост u .

Предполага се, че под действието на силата на сцепление граничните пластове на течността, които се намират в непосредствена близост на двете пластини, имат еднаква с тях скорост, а цялото течение се състои от извънредно голям брой тънки



пластове чиято дебелина е съвсем малка величина Δy^1 . В такъв случай скоростта, с която се движи отделните пластове, ще нарастен от пласт на пласт в посока от долната към горната пластина с величина Δu . Така представената структура на течността е условна, тъй като в действителност дебелината на отделните пластове не може да бъде по-малка от молекулата на течността. С оглед на приетата хидравлична дефиниция на течността, която допуска неограничена делимост на нейните частици, скоростта следва да се изменя непрекъснато, а не скокообразно.

Ако скоростта в някои например в пласт a , е u_a , тогава скоростта в следващия по-горен пласт b ще бъде $u_b = u_a + \Delta u$, което означава, че пласт b ще се плъзга по пласт a с относителна сила на вътрешно триене, в резултат на което пласт a ще се стреми да забави движението на пласт b , а последния да ускори движението на по-долния пласт a .

Поради непрекъснатостта на скоростното поле относителното изменение на скоростта в посока, нормална на нейното направление, ще се характеризира с гранична стойност на отношението $\frac{\Delta u}{\Delta y}$, когато Δy клони към нула.

$$\text{Отношението } \frac{du}{dy} = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta u}{\Delta y} \right) = \operatorname{tg} \beta$$

се нарича градиент на скоростта.

Вискозитетът на маслото обикновено се измерва и определя по два начина, или въз основа на неговия абсолютен вискозитет, или на кинематичния вискозитет.

Динамичния вискозитет на маслото е неговата устойчивост на протичане и срязване поради вътрешно триене и се измерва с SI единици Pas. За разлика от него кинематичният вискозитет на маслото е неговата устойчивост на потоци и срязване поради гравитацията и се измерва с единици SI от m^2 / s . Кинематичният вискозитет на маслото може да бъде получен чрез разделяне на динамичния вискозитет на маслото със съответната му плътност.

Отношението на динамичен вискозитет и плътността ρ на течността се нарича кинематичен вискозитет. Означава се с ν

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \text{ cm}^2 / \text{s} \quad (1)$$



Фиг. 2. Експериментална постановка за измерване на вискозитета.

Динамичния вискозитет на растителното масло се определя с помощта на реометър (HAAKE MARS iQ Air) показан на фигура 2, ротационен вискозиметър с коаксиален цилиндър [2].

Приблизително 25 ml масло се поставят в цилиндър (чаша) CCB41 DG и след това се спуска коаксилният цилиндър

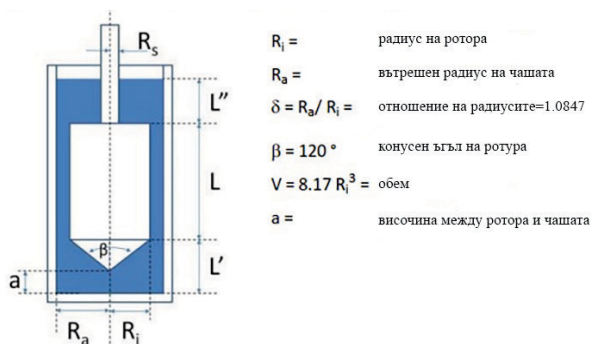


CC41 DG/Ti. Геометричните размери на коаксиалния цилиндър са показани в таблица 1 и на фигура 3. Правилният режим беше зададен за съответната измервателна система и времето за измерване беше фиксирано на 30 секунди.

При измерването температурата на пробата от растително масло се поддържа постоянна от течностен термичен модел, с точност 0.1 °C.

Табл. 1. Геометрични размери на ротора

Ротор	Ri mm	ΔRi mm	L mm	ΔL mm	материал
CC4 1 DG/ Ti	20.71	± 0.004	55.0	± 0.03	Титан 3.7035

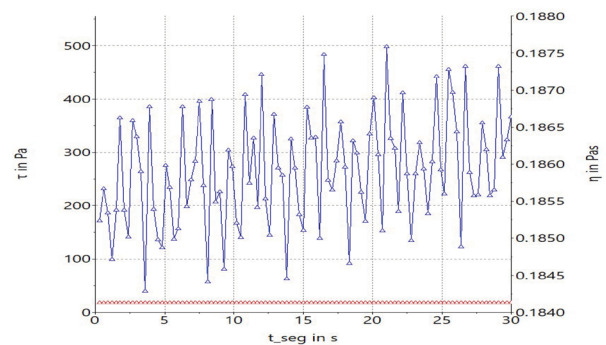


Фиг. 3. Геометрия на ротора и чашата.

Маслата от семена имат огромен потенциал за приложение в различни индустрии. Все повече се доказва, че те са жизнеспособен и възобновим източник на здравословни хранителни мастни киселини и други биоактивни съединения. Маслата от семена показват голямо разнообразие в своите състави на мастни киселини, токофероли, фосфолипиди, сфинголипиди и стероли в зависимост от растителния вид. Есенциалните мастни киселини, като омега-3 и омега-6 PUFA, се извличат от ма-

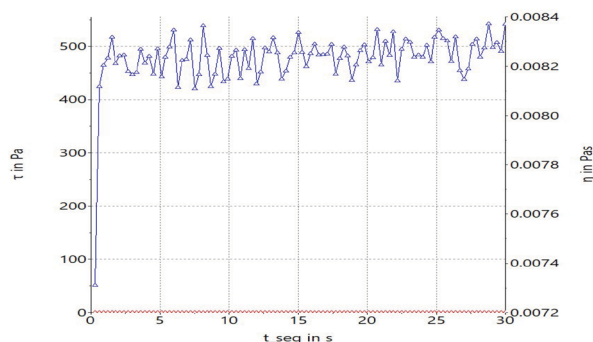
сла от семена и се провеждат обширни проучвания за потенциалната им употреба като алтернатива на петролните продукти в различни индустрии. Тази глава разглежда източниците на масла от семена, техните методи за извличане и характеризирани заедно с тяхната биоактивност. Изброени са ботаническите източници на някои важни масла от семена, заедно с докладваните за тях биоактивни съставки. Беше наблюдавано, че различните методи на екстракция и условията на екстракция оказват влияние върху добива и качеството на маслата. Различни методи за наблюдение на качеството и профилирането на маслото от семена и полезните и укрепващи здравето дейности на фитохимикалите заедно с техните козметични приложения също са подчертани [4].

На фигура 4 е показан експерименталният резултат на вискозитета на растителното масло при температура 3 °C. От получения резултат се вижда, че вискозитета на маслото се променя от 0.1848 до 0.1875 Pas.



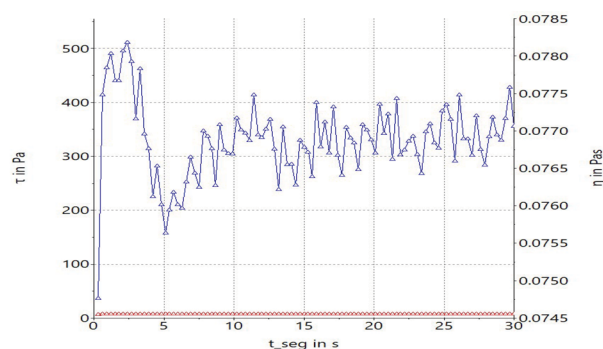
Фиг. 4. Реограма на вискозност при 3 °C.

На фигура 5 е показан експерименталният резултат на вискозитета на растителното масло при температура 100 °C. От получения резултат се вижда, че вискозитета на маслото се променя от 0.0082 до 0.0084 Pas.

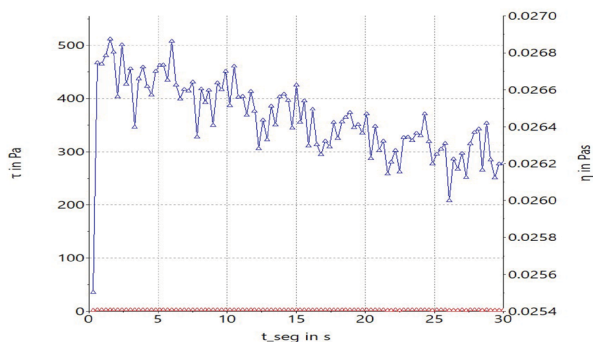


Фиг. 5. Реограма на вискозност при 100 °С.

На фигура 6 и фигура 7 са показани експерименталният резултат на вискозитета на растителното масло при температура 20 °С и 50 °С. От получения резултат се вижда, че вискозитета на маслото се променя от 0.0745 до 0.0780 Pas при температура от 20 °С и от 0.0254 до 0.0268 Pas при 50 °С.



Фиг. 6. Реограма на вискозност при 20 °С.



Фиг. 7. Реограма на вискозност при 50 °С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Семената са обещаващи възобновяеми и по-евтини източници на хранителни и индустриални масла. Много традиционни системи използват масла от семена заради множеството им ползи за здравето и биоактивност [5].

Бяха проведени серия от експерименти за определяне поведението на растително масло при различни температури.

Резултатите показват, че вискозитетът на растителното масло има поведение на типична нютонова течност. Динамичния вискозитет на растителното масло намалява с повишаване на температурата.

Резултатите от изследването на реологичните характеристики могат да се използват при определяне на хидравлични загуби и хидротранспорт на растителни масла в различни технологични съоръжения.

Благодарност:

Авторите изказват своята благодарност на проект BG05M2OP001-1.002-0023 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Иванов П., Христов Х., Механика на флуидите, Университетско издателство „Васил Априлов“ Габрово, 2009.
- [2] HAAKE MARS Rheometer Instruction Manual, thermos scientific, 006-2766, version 1.1, 2015.
- [3] Paroline G., Paar A., Basics of Applied Rheology, Oregon State University Corvallis, OR, August 10, 2016.
- [4] Pachau L., Devi Ch., Goswami Ab., Sahu S., Seed Oils as a Source of Natural Bio-active Compounds, September 2019, pp. 209-235, DOI:10.1007/978-981-13-7154-7_8
- [5] Yang C, Liu XM, Chen Z et al Comparison of oil content and fatty acid profile of ten new *Camellia oleifera* cultivars, 2016, pp.1–6



ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ОСТАТЪЧНИТЕ НАПРЕЖЕНИЯ ОКОЛО СКРЕПИТЕЛНИ ОТВОРИ В АЛУМНИЕВА СПЛАВ 2024-T3, ВЪВЕДЕНИ ЧРЕЗ МОДИФИЦИРАН SPLIT MANDREL МЕТОД

EXPERIMENTAL STUDY OF RESIDUAL STRESSES AROUND FASTENER HOLES IN 2024-T3 ALUMINUM ALLOY VIA MODIFIED SPLIT MANDREL METHOD

Vladimir Petrov Dunchev

Technical University of Gabrovo

Petya Hristoforova Daskalova

Technical University of Gabrovo

Abstract

The article presents outcomes from an experimental study of residual stresses around fastener holes in aluminum alloy 2024-T3. The hole pre-stressing was performed via new method based on split mandrel cold working method using special device. This cold working method provides constant tightness (interference fit) between the mandrel major diameter and previously drilled hole. This allows to eliminate some of the control operations in the technological cycle and thus to reduce production costs. The circumferential residual stresses were measured using X-ray diffraction technique and $\sin^2\psi$ method with a least-squares fitting procedure. It was successively investigated: the influence of the initial diameter size scattering of the hole on the residual stress distribution immediately after hole cold working, the evolution of the introduced residual stresses depending on the thickness of the sheared metal layer by countersinking the cold worked hole, and the influence of the initial hole diameter size scattering on the final residual stress distribution. It was found that regardless of the relatively large scattering of the initial diameter size of the hole, the used method of hole cold working provides a practically constant zone of useful circumferential residual stresses around the pre-stressed hole. It was proven that the removal of a layer of metal with a suitable thickness by means of final countersinking can homogenize the area with residual compressive stresses around the hole in the axial direction.

Keywords: 2024-T3 aluminum alloy; cold hole expansion; modified Split Mandrel Method; residual hoop stresses; X-ray diffraction analysis

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Скрепителните отвори в конструкционните елементи са най-често срещаните естествени концентратори на напрежения и деформации, поради което те са потенциални места за зараждане и развитие на пукнатини от умора на материала. Уморните разрушения са типични за конструкционните елементи в самолетостроенето, където техният дял е 50-90 % от всички повреди на компонентите [1]. Разработването на подходи за повишаване на уморната дълготрайност е не само инвестиция за удължаване на

жизнения цикъл и намаляване на разходите за планови ремонти и поддържане на съоръженията, но и защита на най-ценния капитал – човешкия фактор. Един от основните подходи за повишаване на уморната дълготрайност е подходът за създаване на полезни остатъчни напрежения (ОН) на натиск около отворите преди въвеждане на конструкционните елементи в експлоатация. Много изследвания са посветени на полезния ефект от наличието на зона с ОН на натиск [2-9], както и на оценка на релаксацията на ОН [10-13]. Идеята за полезния



ефект от създаване на зона с полезни окръжни ОН на натиск, следствие преминаване на инструмент през отвора открай докрай по направление на оста му, за първи път е развита и патентована от Boeing за превенция срещу възникване и развитие на уморни пукнатини около отворите в носещи компоненти в самолетостроенето [14]. Отличителна характеристика на метода е използването на монолитен конусно-цилиндричен дорн и разрязана тънкостенна втулка-посредник от неръждаема стомана с вътрешно мазане. Втулката се поставя около дорна и заедно с него се въвежда в отвора. Отворът се разширява при изтеглянето на дорна обратно през разрязаната втулка, причинявайки пластична деформация на значителна дълбочина около отвора и еластична такава в по-отдалечените слоеве. Материалът около отвора се оказва натиснат след преминаване в ново еластично равновесие поради естествения стремеж на еластично деформираните по-отдалечени слоеве да се върнат в първоначалното си състояние. През годините пионерният метод [14] е претърпял множество подобрения, като понастоящем най-широко приложение намира методът Split Sleeve Cold Expansion (SSCE), собственост на Fatigue Technology Inc. [15], при който разрязаната втулка за еднократна употреба се изважда автоматично от обработения отвор. Като алтернатива на необходимостта от втулка-посредник за еднократна употреба Hogenhout (1986) разработва метода Split Mandrel Cold Working (SMCW), собственост на компанията West Coast Ind. за приложение конкретно в аероиндустрията [16]. Методът SMCW включва използването на кух надлъжно разрязания на четири части дорн, който след като се въведе в отвора, се “втвърдява”, достигайки работния си диаметрален размер посредством осово преместване на щифт, разположен в централен отвор на дорна. След това дорнът се изтегля през отвора, при което го разширява.

Технологичните цикли на методите SSCE и SMCW реализират принципно една и съща концепция. Степента на студено разширение (CP) на отвора DCE (Degree of Cold Expansion) зависи единствено от диаметралните размери на дорна при SSCE или на дорна и щифта при SMCW, както и от диаметъра на предварително пробития и райберован отвор. За да се гарантира зададената със съответен допуск стегнатост между деформи-рацията дорн и предварително обработения отвор, е необходимо осъществяването на контрол по геометричен критерий (чрез калибри), както на диаметъра на предварително пробития отвор, така и на работната част на дорна срещу износване. Големият брой операции повишава цената на обработката. Същевременно се изисква много тесен допуск на диаметралния размер на предварително обработените отвори, което значително оскъпява технологичния процес като цяло. Следователно, процесът CP, реализиран чрез най-конкументните методи SSCE и SMCW по същество съответства на размерен процес. Като контрапункт на тези недостатъци, Максимов и Дунчева изобретяват нов метод за CP [17], който по същество е модификация на метода SMCW. В основата на модифицирания SMCW метод е идеята за трансформиране на процеса на CP с транслационно преминаване през отвора конусно-цилиндричен дорн от размерен към неразмерен. Методът осигурява една и съща стегнатост в условията на относително по-широк допуск на диаметралния размер на предварително обработените отвори. Това позволява да се елиминират операциите на контрол в технологичния цикъл и значително да се намалят производствените разходи. Експериментално е доказана ефективността на новия метод по геометричен критерий върху кръгли образци от алуминиева сплав 2024-T3 в условията на относително широк допуск на обработени само чрез свредловане отвори



[18]. Липсват обаче изследвания за оценка на ефективността на новия метод по отношение на въведените полезни ОН в качествен и количествен аспект.

Целта на настоящото изследване е да се оцени в качествен и количествен аспект ефективността на модифицирания Split Mandrel метод относно разпределението на

окръжните ОН. За измерване на ОН е използван X-ray diffraction анализ.

2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДИ

2.1. Материал

Материалът е алуминиева сплав 2024-T3 във вид на прът с диаметър ϕ 32 mm с химичен състав, показан в Табл. 1.

Химичен състав на 2024-T3 във вид на прът

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr
94.03	0.746	0.485	1.64	0.764	1.67	0.0192	0.0382
Ni	Ti	Be	Ca	Li	Pb	Sn	Sr
0.0186	0.0280	<0.0001	>0.0200	0.0025	0.237	0.0237	0.0004
V	Na	Bi	Zr	B	Ga	Cd	Co
0.0106	0.0156	0.0203	0.0074	<0.0005	0.0237	<0.0010	<0.0020
Ag	Hg	In	Sb	Ce	La	Mo	Sc
0.0018	<0.0050	0.0116	0.140	0.0197	0.0055	0.0037	<0.0005

Таблица 1

Механичните характеристики са обобщени в Табл. 2 на базата на експеримент на

едномерен опън на плоски образци, проведен върху изпитвателна машина Zwick/Roell Vibrophore 100.

Механични характеристики 2024-T3 във вид на прът

Механични x-ки	Граница на провлачване $R_{0,2}$, МПа	Якост на опън R_m , МПа	Относително удължение A_5 , %
Стойност	319	430	17.5

Таблица 2

2.2. Експериментални образци

Експерименталните образци са тип втулки с номинални габаритни размери: външен диаметър $D = 32$ mm и височина (дебелина) $\delta = 6$ mm. За да се оцени влиянието на

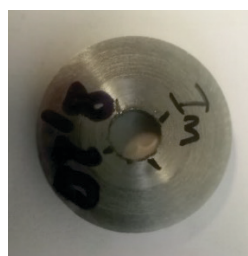
разсейването на диаметъра на предварително обработените отвори, изследванията са проведени върху четири образца, чиито отвори са пробити с различен номинален диаметър, както следва (фиг. 1а, б, в, г): $d_o = 8.14, 8.16, 8.20, 8.30$ mm.



а.



б.



в.



г.

Фиг. 1. Експериментални образци



След СР отворите допълнително са обработени чрез последователно райбероване за осигуряване на отвори с диаметри $d = 8.4, 8.5, 8.6 \text{ mm}$. По този начин е оценено влиянието на дебелината на срязания слой метал около отворите върху еволюцията на окръжните ОН в корелация с диаметъра на предварително обработените отвори d_0 .

2.3. Същност и реализация на модифицирания Split mandrel метод

В основата на новия метод е идеята за трансформиране на процеса СР с трансляционно преминаващ през отвора инструмент от размерен към неразмерен. За техническа реализация на новия метод са създадени инструмент и устройство, осигуряващи една и съща стегнатост в условията на относително по-широк допуск на диаметралния размер на предварително обработените чрез рязане отвори [17]. Основните етапи на технологичният цикъл в съответствие с основните варианти на изпълнение на инструмента и устройството съгласно изобретението, са показани на фиг. 2а, б, в, г. Инструментът за СР на отвори включва частично надлъжно разрязан дорн (фиг. 2а), така, че са оформени поне три симетрични сегмента на дорна, в осов отвор на който е позициониран конусно-цилиндричен осово подвижен щифт. Работната част на дорна включва две конусни повърхнини, свързани помежду си с цилиндрична повърхнина (чийто диаметър е равен на максималния диаметър на отворите, подлежащи на СР). Конусната повърхнина на щифта влиза в контакт с повърхнината на конусен отвор, изработен в разрязания край на дорна, като двете конусни повърхнини имат един и същ ъгъл на наклона α . Работната конусна повърхнина на работната част на дорна преминава в цилиндрична повърхнина, по която се установява отвора, подлежащ на СР.

Технологичният цикъл за СР на отвори съдържа следните основни етапи (фиг. 2а,б,в,г) [17, 18]:

● *I етап: Въвеждане на дорна на инструмента в предварително пробития отвор*

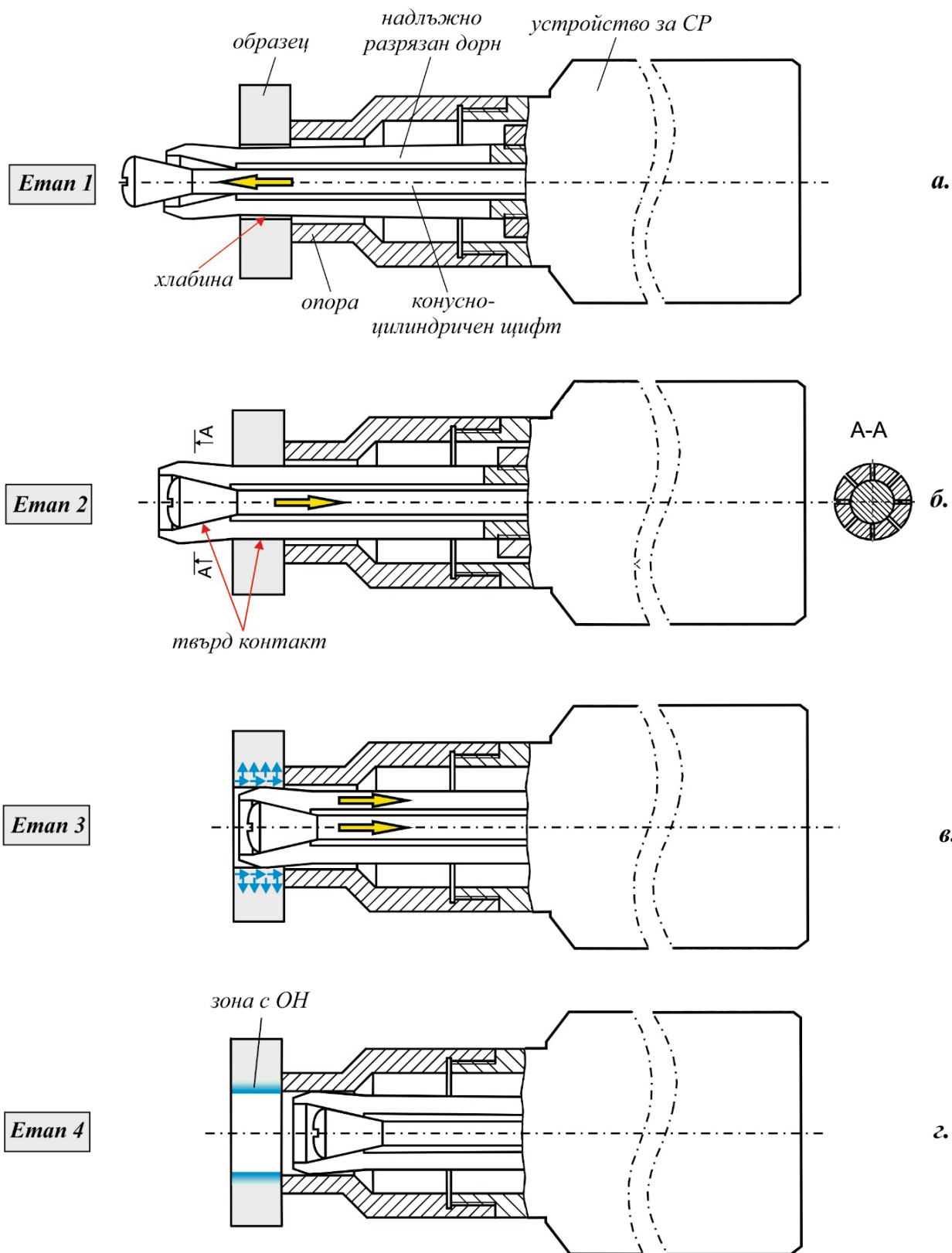
Вкарването на инструмента се улеснява от предната конусна повърхнина, изработена върху работната част на разрязания дорн (фиг. 2а). Между цилиндричната повърхнина на дорна и повърхнината на отвора съществува хлабина. Щифтът се премества осово по отношение на дорна наляво, така, че конусната му повърхнина не контактува с конусната повърхнина на дорна (фиг. 2а). Това позволява еластична деформация на сегментите на разрязания дорн в радиално направление, при което дорнът лесно се въвежда в предварително пробития отвор;

● *II етап: Компенсирание на хлабината между установъчната цилиндрична повърхнина на дорна и стресирания отвор*

През този етап щифтът се премества осово, така, че конусната му повърхнина влиза в контакт с конусната повърхнина на отвора, изработен в дорна. Това причинява радиално преместване на сегментите на дорна, в резултат на което цилиндричната му повърхнина влиза в плътен контакт с повърхнината отвора (фиг. 2б). В тази позиция диаметърът на работните цилиндрични повърхнини от работните части на дорна е по-голям от диаметъра на предварително пробития отвор в детайла. Достигането на плътен контакт гарантира постоянна стегнатост при реализацията на СР, тъй като последната зависи единствено от разликата между диаметъра на работната цилиндрична част от дорна и диаметъра на цилиндричната установъчна повърхнина от същия (виж фиг. 3).

● *III етап: СР на отвора*

Етапът на СР се реализира чрез осово преместване на дорна съвместно с щифта, при което работните конусни и цилиндрични повърхнини на дорна преминават през предварително пробития отвор, деформирайки го пластично (фиг. 2в).



Фиг. 2 Етапи от технологичния цикъл

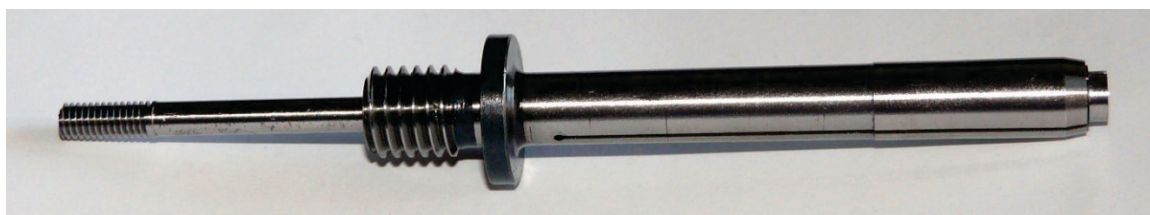
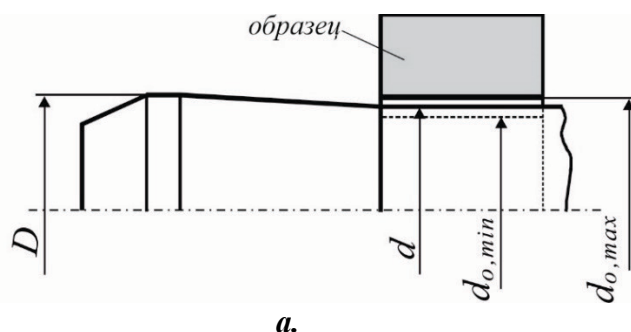


• IV етап: Излизане на работната част от инструмента от стресирания отвор и формиране на зоната с полезни окръжни ОН около отвора

След прекратяване на въздействието на дорна върху отвора, на естествения стремеж на материалните частици да заемат първоначалното си положение се противопоставя

провлачилият слой метал около отвора, чийто диаметър се е увеличил. Възпрепятствано свиване на метала около отвора води до формиране на зона с полезни ОН на натиск (фиг. 2г).

Инструментът, реализиращ модифицирания процес за СР на отвори, е показан на фиг. 3а, б.



Фиг. 3 Инструмент, реализиращ модифицирания процес на СР
а. геометрия на работната част; б. общ вид на инструмента

В условията на плътен контакт, т.е. по време на СР, стегнатостта i зависи само от разликата между максималния и минимален диаметър на работната част на разрязания дорн (фиг. 3а):

$$i = D - d \quad (1)$$

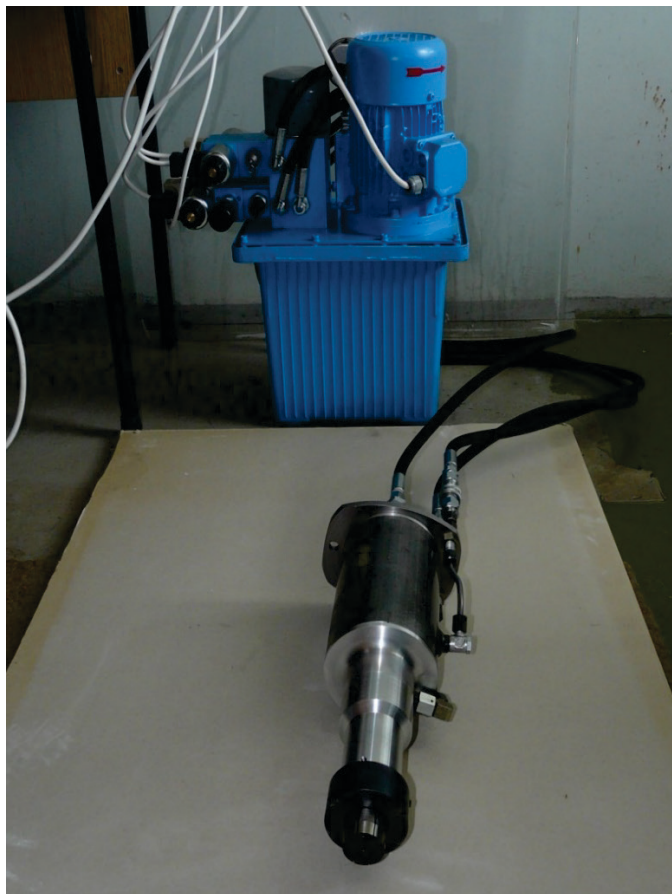
Следователно, $i = const$, тъй като не зависи от разсейването на диаметрите на предварително обработените чрез рязане отвори. Изменението на стегнатостта i във времето ще зависи единствено от износването на работните части на разрязания дорн. Степента на СР DCE е числено равна на окръжната линейна деформация за точките

от повърхнината на отвора. Нейното изменение се определя от граничните стойности на диаметъра на обработваните отвори $d_{o,min}$ и $d_{o,max}$ (фиг. 3а):

$$DCE_{max} = \varepsilon_{t,max} = \frac{i}{d_{o,min}} \times 100, \%$$

$$DCE_{min} = \varepsilon_{t,min} = \frac{i}{d_{o,max}} \times 100, \% \quad (2)$$

В настоящото изследване граничните стойности на DCE са: $DCE_{min} = 3.85$; $DCE_{max} = 3.93$. За реализация на модифицирания процес на СР е използвано устройство с хидравлично задвижване. Общият вид на устройството и инструмента са показани на фиг. 4.



Фиг. 4 Устройство и инструмент за реализация на модифицирания процес на СР

2.4. X-ray diffraction анализ за измерване на остатъчните напрежения

За измерването на ОН беше използван дифрактометър D8 ADVANCE с колиматор с pin-hole $\varnothing 1.0 \text{ mm}$. Режимът на работа на рентгеновата тръба (високо напрежение/ток) е с $30 \text{ kV} / 40 \text{ mA}$. За определяне на остатъчните напрежения е използван $\sin^2\psi$ методът и числена процедура, базирана върхуметода на най-малките квадрати. Измереният дифракционен профил на равнината Al {311} има своя максимум при $2\theta \approx 139.3^\circ$ за използваното хромово лъчение, филтрирано чрез VK α филтър. Дифракционните профили са определени по метода Pearson VII, като се изчисляват деформациите на решетката на алуминиевата

сплав в направление Al {311}. За обобщения закон на Хук беше приложен методът на Winholtz и Cohen, като са използвани еластични константи с големини: $s_1 = -4.514 \text{ TPa}^{-1}$ и $\frac{1}{2}s_2 = 18.19 \text{ TPa}^{-1}$. Параметрите, използвани в експеримента, са както следва: 2θ диапазон от $135^\circ - 143^\circ$, 2θ стъпка от 0.5° и наклон, дефиниран чрез $\sin^2\psi = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ както за положителни, така и за отрицателни стойности на ъгъл ψ . Ефективната дълбочина на проникване на CrK α лъчението е в диапазона $6.5 - 11.0 \mu\text{m}$.

Предвид физическата същност на модифицирания Split mandrel метод обект на измерване са окръжните ОН в радиално направление от ръба на отвора по входната и



изходната страна на инструмента в следните две характерни равнини: 1). Равнината на симетрия на сегмента; 2). Равнината на симетрия на прореза.

3. РЕЗУЛТАТИ И КОМЕНТАРИ

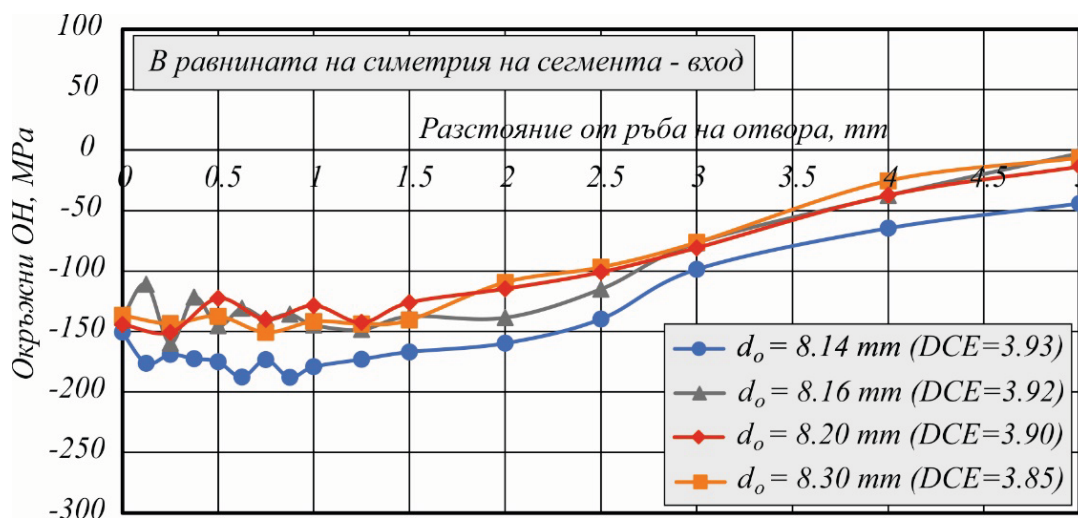
3.1. Влияние на разсейването на диаметъра на предварително обработения отвор (DCE) върху ОН след СР в окръжно направление

Фиг. 5а, б, в, г визуализира влиянието на разсейването на предварително обра-

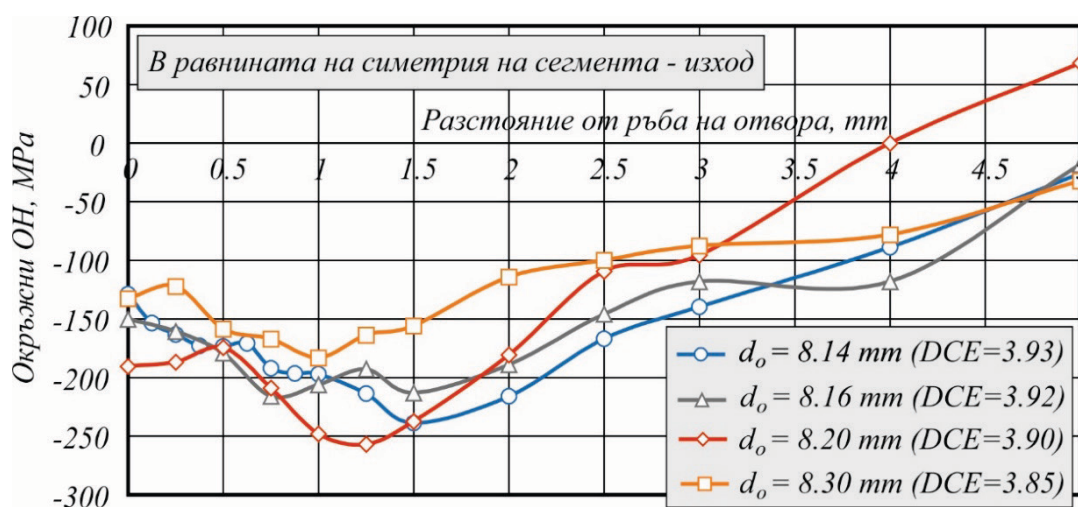
тените отвори, респ. влиянието на изменението на DCE, върху разпределението на окръжните ОН, получено непосредствено след СР.

Експерименталните резултати дават основание за следните коментари:

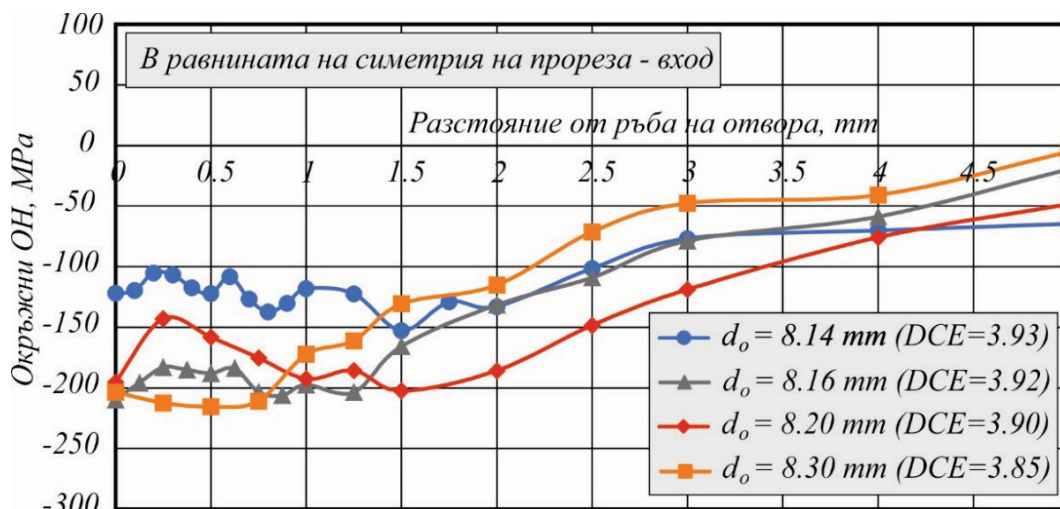
- Наблюдава се осов градиент в разпределението на ОН, характерен за всички методи за СР с транслационно преминаващ през отвора деформиращ инструмент – натискватата зона е по-изразена откъм изходната страна вследствие движещата се деформационна пластична вълна в осово направление;



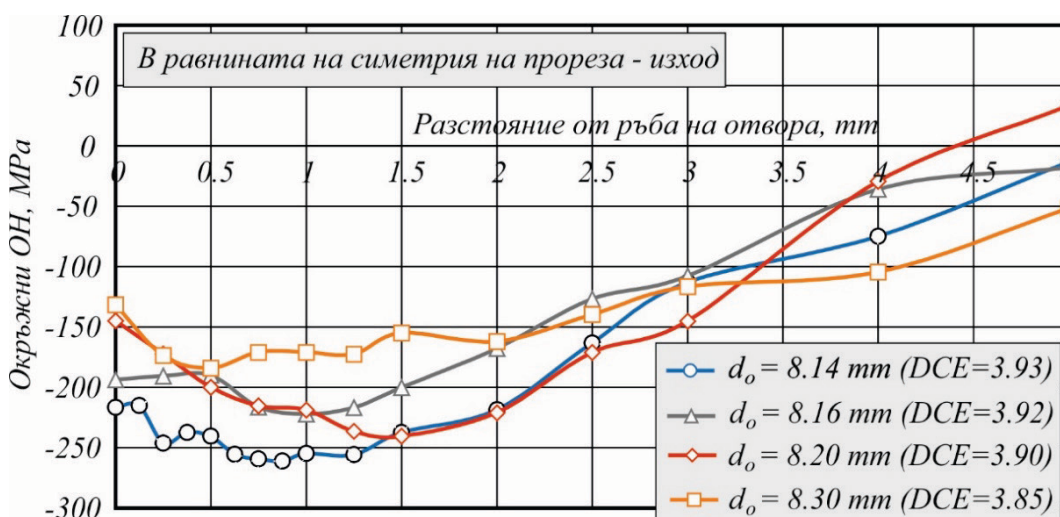
а.



б.



6.



7.

Фиг. 5 Влияние на разсейването на изменението на DCE върху разпределението на ОН след СР

• Разсейването на диаметъра на предварително обработените отвори в изследвания диапазон (DCE) рефлектира в определено разсейване на разпределението на ОН, което има различен характер в двете равнини на симетрия. Повърхностните ОН са групирани най-силно по входната страна в равнината на симетрия на сегмента (фиг. 5а), където разликата е само 7.6 МПа. Разсейването на повърхностните ОН е относително

по-голямо в равнината на симетрия на разреза (фиг. 5в, г), като не се наблюдава съществена разлика по входната и изходната страна на образците;

• Изменението на DCE рефлектира в противоположни тенденции на разпределение на ОН по входната и изходната страна за двете равнини на симетрия. Максималната стойност на DCE води до най-силно изразена натискава зона по входната страна в равнината на симетрия на сегмента (фиг. 5а)

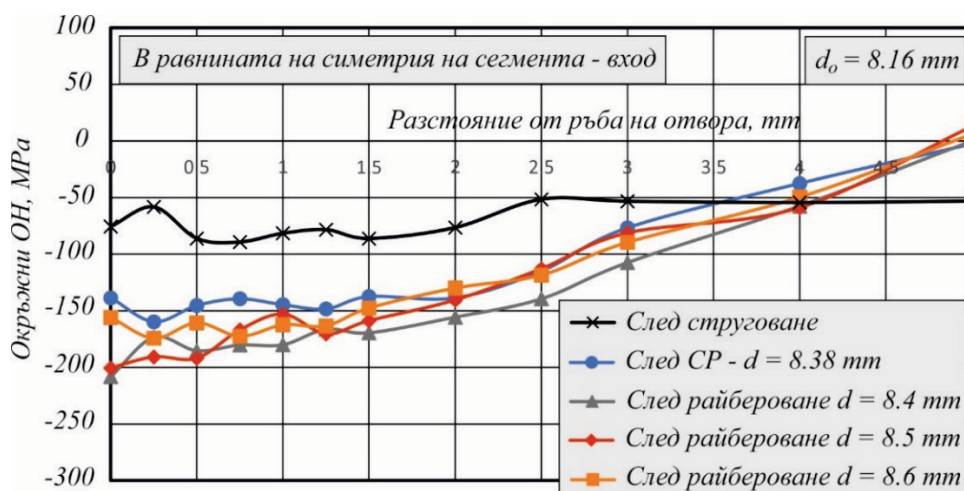


и обратно – натисквата зона, съответстваща на $DCE = 3.93$, е на най-слабо изразена по входната страна в равнината на симетрия на прорежа. За входната страна, реализирането на процес на СР с минимална стойност на DCE ($DCE = 3.85$) води до относително най-малки по абсолютна стойност натискови ОН в равнината на симетрия на сегмента (фиг. 5а) и относително най-големи по абсолютна стойност натискови ОН в равнината на симетрия на прорежа (фиг. 5в). Противоположна е тенденцията за разпределението на ОН за $DCE = 3.85$ по изходната страна (фиг. 5б и фиг. 5г).

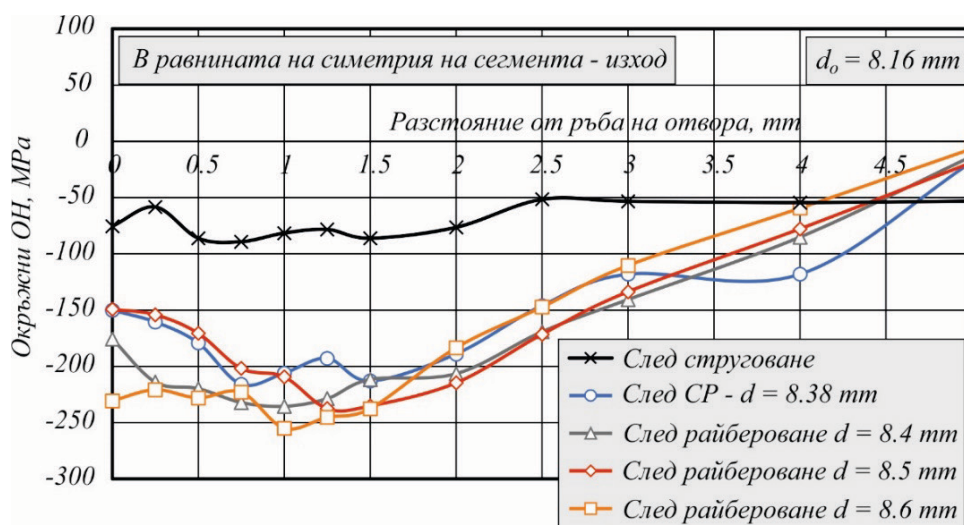
3.2. Еволюция на ОН в зависимост от дебелината на срязания слой метал около отвора

Еволюцията на разпределението на окръжните ОН в образец с начален диаметър на отвора d_0 mm след струговане, СР и последователно райбероване до постигане на отвори с диаметри $d = 8.4, 8.5, 8.6$ mm е показана на фиг. 6а, б, в, г.

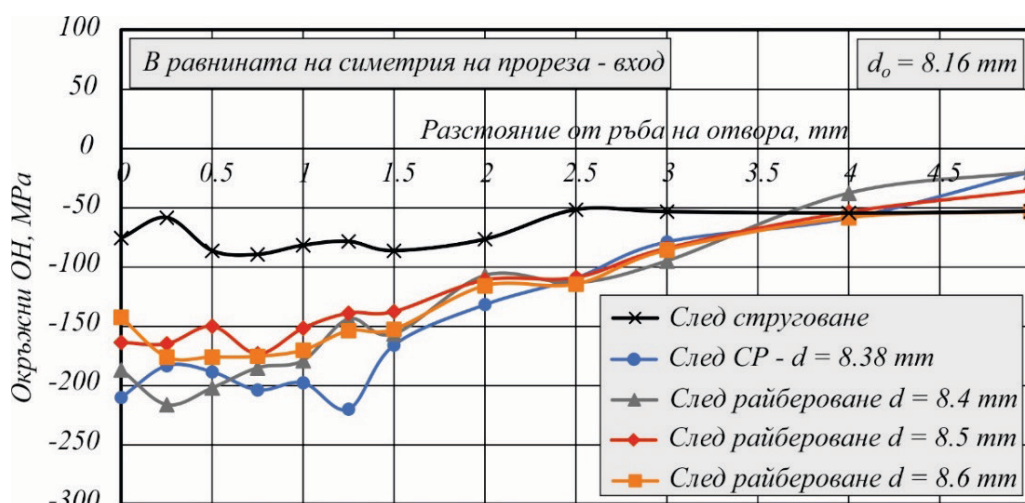
• Еволюцията в разпределението на ОН след струговане потвърждава ефективността на новия метод за създаване на изразена зона с полезни ОН на натиск около повърхнината на стресирания отвор;



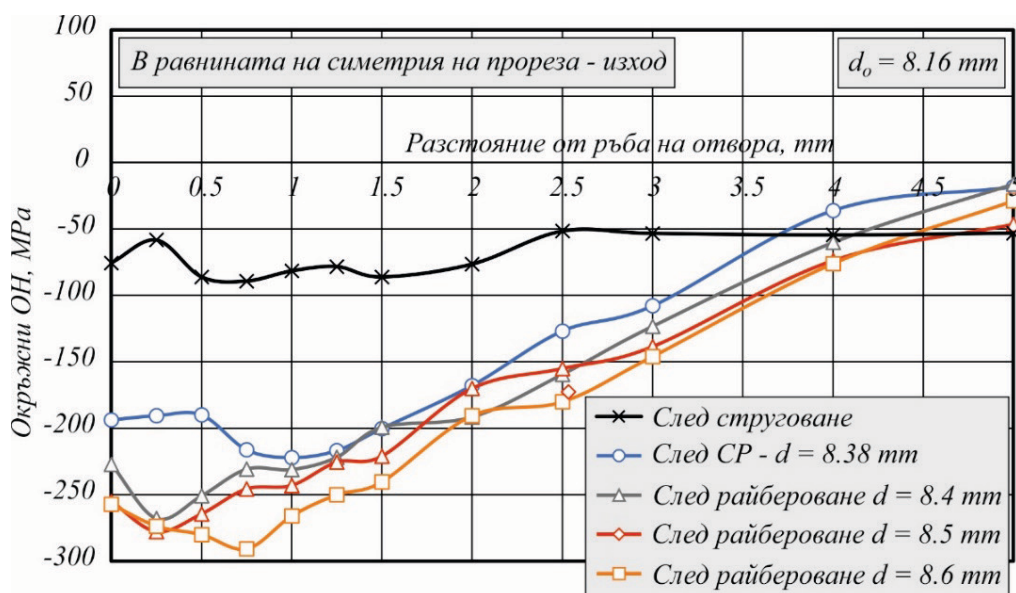
а.



б.



6.



2.

Фиг. 6 Еволюция на ОН след струговане, СР и последователно райбероване на отворите

• Като цяло, премахването на пластично деформирани слоеве метал около стресиращия отвор чрез райбероване рефлектира в преразпределение на ОН по посока на интензифициране на натисквата зона с изключение на преразпределението в равнината на симетрия на прорежа по входната страна на образеца. Ефектът на интензифи-

циране на зоната с натискови ОН се проявява в различна степен в зависимост от дебелината на премахнатия слой метал в двете равнини на симетрия;

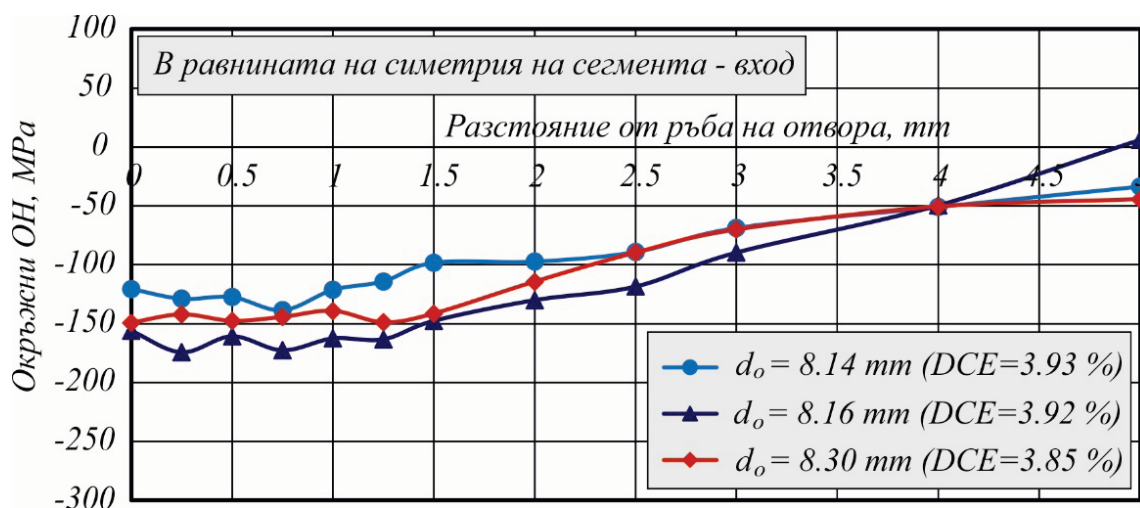
• Експериментално получените графики дават възможност да се избере подходяща дебелина на срязания слой, която да доведе до хомогенизиране на зоната с ОН по



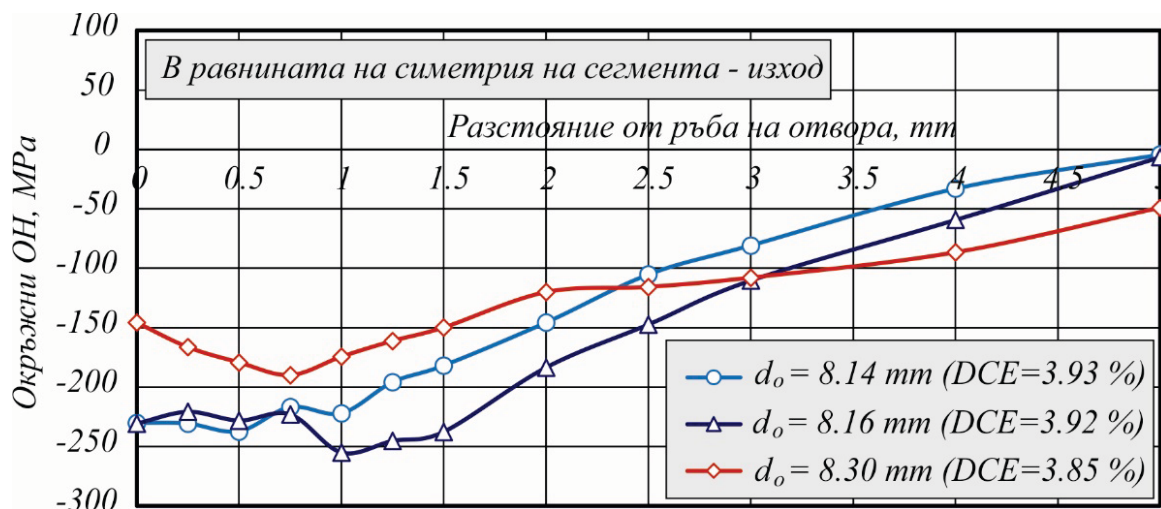
направление на оста на отвора. В конкретния случай допълнителното премахване на тънък слой метал с дебелина 0.08 mm след СР до достигане на отвор с диаметър $d = 8.4\text{ mm}$ води до намаляване на осовия градиент, т.е. до хомогенизиране на зоната с полезни ОН на натиск около отвора. Полезният ефект се дължи на преразпределението на окръжните ОН след премахване на слой метал с подходяща дълбочина. Ефективността на този подход е обоснован и доказан както за кръгли, така и за некръгли отвори [18, 19, 20]. Следователно, премахването на тънък слой метал с подходяща дебелина чрез задължителната операция райбероване може да доведе до хомогенизиране на зоната с ОН на натиск в осово направление, и по този начин да подобри уморното поведение.

3.3. Влияние на разсейването на диаметъра на предварително обработения отвор (DCE) върху финалното разпределение на ОН

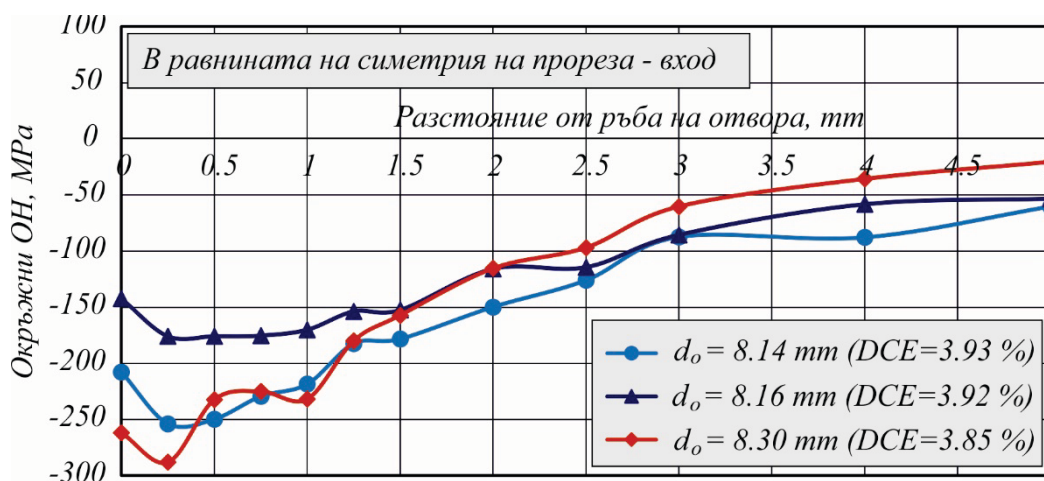
Фиг. 7а, б, в, г визуализира финалното разпределение на ОН в двете равнини на симетрия по входната и изходната страна на образците в зависимост от диаметъра на предварително обработения отвор. Интерес представлява подходът, осигуряващ един и същ финален диаметър на стресираните отвори. Обект на сравнително изследване са образци с предварително обработени отвори с диаметри $d_o = 8.14, 8.16, 8.30\text{ mm}$ и финален диаметър $d = 8.6\text{ mm}$. По този начин се оценява изменението във финалното разпределение на ОН в зависимост от дебелината на срязания слой метал след финалното райбероване. Такава е и основната идея в изследвания модифициран метод за СР.



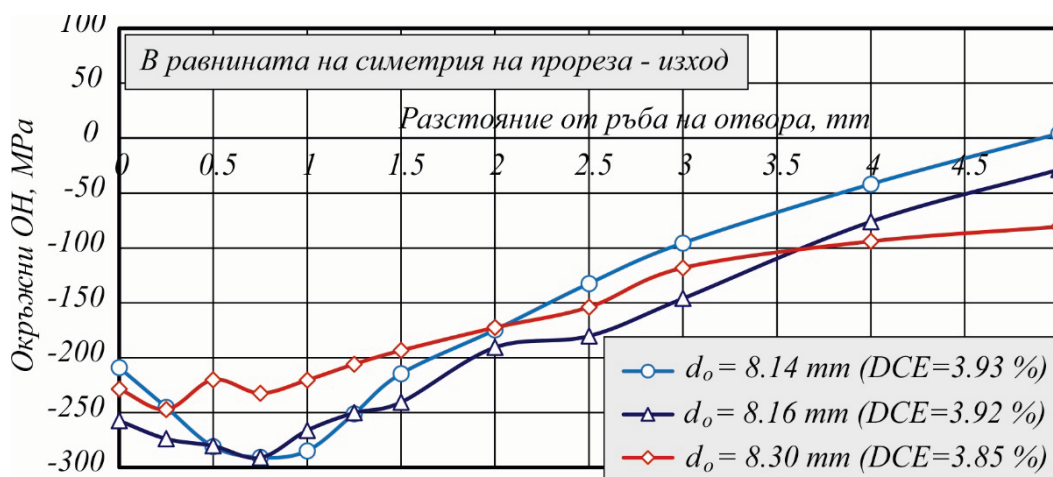
а.



б.



в.



г.

Фиг. 7 Влияние на разсейването на диаметъра на предварително обработения отвор върху финалното разпределение на ОН



Експерименталните резултати показват следното:

- Не се наблюдава еднозначна тенденция в изменението на финалното разпределение на ОН в зависимост от диаметъра на предварително обработения отвор в двете равнини на симетрия по входната и изходната страна. Разсейването е относително най-малко ($\approx 40 MPa$) по входната страна в равнината на симетрия на сегмента, а най-голямо ($\approx 120 MPa$) – по входната страна в равнината на симетрия на прореза;

- Независимо от различната дебелина на срязания слой метал, модифицираният Split Mandrel метод осигурява устойчива зона с ОН на натиск в близост до повърхнината на отвора в двете равнини на симетрия и по двете страни на образците. Създадената натискова зона се характеризира с голяма дълбочина – $\geq 5 mm$ от ръба на отвора.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Използвайки разработените инструмент и устройство, реализиращи процес на СР в съответствие с модифицирания Split Mandrel метод, е проведено експериментално изследване на разпределението на ОН в образци тип „втулки“ от алуминиева сплав 2024-T3. Получените посредством X-ray diffraction анализ експериментални резултати могат да бъдат обобщени, както следва:

- Установено е, че относително голямо разсейване на диаметъра на предварително обработените отвори ($0.16 mm$) води до определено разсейване на разпределението на ОН, което има различен характер в равнината на симетрия на сегмента и равнината на симетрия на разреза. Положителен факт е, че независимо от полученото разсейване измерените ОН в близост до ръба на отвора са подчертано натискови и по двете страни на образците след всички интервенции – след СР и след допълнителното райбероване на отворите;

- Доказана е ефективността на модифицирания Split Mandrel метод за реализиране на неразмерен процес на СР, осигуряващ достатъчно интензивна и дълбока зона ($\geq 5 mm$) с полезни ОН на натиск в условията на относително голямо разсейване на диаметъра на предварително обработения отвор;

- Доказано е, че премахването на слой метал с подходяща дебелина посредством финално райбероване може да хомогенизира зоната с ОН в осово направление. Полученият като резултат по-малък осов градиент благоприятства повишаване на уморната дълготрайност.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Abdelkrim Aid, Zahar Semari, Mohamed Benguediab, Finite Element Method Investigation of the Effect of Cold Expansion Process on Fatigue Crack Growth in 6082 Aluminum Alloy. Modeling and Numerical Simulation of Material Science (2014) 4 25-31.
- [2] Webster G. A., Wimpory R. C. Non-destructive measurement of residual stress by neutron diffraction. Journal of Material Processing Technology 117 (3) (2001) 395-399.
- [3] Lacarac V. D., Smith D. J., Pavier M. J. The effect of cold expansion on fatigue crack growth from open holes at room and high temperature. International Journal of Fatigue 23(0) (2001) 161-170.
- [4] Chakherlou T. N., Vogwell J., A novel method of cold expansion which creates near-uniform compressive tangential stress around a fastener holes. Fatigue Fract Engng Mater Struct 27 (2004) 343-351.
- [5] Maximov JT, Duncheva GV. A new 3D finite element model of the spherical Mandrelling process. Finite Elements in Analysis and Design 44 (6-7) (2008) 372-382.
- [6] Yucan F., Ende G., Honghua S., Jiuhua X., Renzberg L. (2015) Cold expansion technology of connection holes in aircraft structures: A review and prospect. Chines Journal of Aeronautics 28 (4) 961-973.
- [7] Kumar S. A., Babu N. C. M. (2017) Influence of induced residual stresses on fatigue performance



of cold expanded fastener holes. *Materials Today: Proceedings* 4 2397-2402.

[8] Yan-Li W., You-Li Z., Shuai H., Han-Xiao S., Young Z. (2017) Investigation on fatigue performance of cold expansion holes of 6061-T6 aluminum alloy. *International Journal of Fatigue* 95 216-228.

[9] Yasniy P., Glado S., Iasnii V. (2017) Lifetime of aircraft alloy plates with cold expanded holes. *International Journal of Fatigue* 104 112-119.

[10] Zhuang W. Z., Halford G. R. Investigation of residual stress relaxation under cyclic load. *International Journal of Fatigue* 23(0) (2001) 31-37

[11] Maximov JT, Duncheva GV, Mitev IN. Modelling of residual stress relaxation around cold expanded holes in carbon steel. *Journal of Constructional Steel Research* 65 (2009) 909-917

[12] Chakherlou T. N., Yaghoobi A. Numerical simulation of residual stress relaxation around a cold expanded fastener hole under longitudinal cyclic loading using different kinematic hardening models. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 33(11) (2010) 740-751.

[13] Maximov J.T., Duncheva G.V., Anchev A.P., An approach to modeling time-dependent creep and residual stress relaxation around cold worked

holes in aluminium alloys at room temperature. *Engineering Failure Analysis* 45 (2014) 1-14.

[14] Champoux L. A. Coldworking Method and Apparatus. USA Patent 3566662, Patented March 2, 1971.

[15] Quincey D. E., Copple C. M., Walsh W. B., Jarzebowicz R. Z., Easterbrook E. T. Split sleeve cold expansion. USA Patent 5305627, Patented Apr. 26, 1994.

[16] Hogenhout F. Method and apparatus for hole coldworking. USA Patent 4583388, Patented April 22, 1986.

[17] Maksimov YT, Duncheva GV, Device and tool for cold expansion of holes. International Publication Number WO 2014/012153 A1, January 2014

[18] Дунчева ГВ. Синтез и оптимизация на методи за повишаване на уморната дълготрайност на метални конструкционни елементи с отвори. Дисертация за получаване на научната степен „доктор на науките“, Габрово, 2017.

[19] Maximov JT, Duncheva GV, Ganev N. Enhancement of Fatigue Life of Net Section in Fitted Bolt Connections. *Journal of Constructional Steel Research* 74 (2012) 37-48.

[20] Duncheva GV, Maximov JT, Ganev N., Ivanova MD. Fatigue life enhancement of welded stiffened S355 steel plates with noncircular openings. *Journal of Constructional Steel Research* 112 (2015) 93-107.



NANOHARDNESS AND MODULE OF ELASTICITY OF CR-BASED NITRIDE COATINGS DEPOSITED AT TEMPERATURES BELOW 200°C

Vassiliy Chitanov^a, Ekaterina Zlatareva^{a*}, Lilyana Kolaklieva^a, Roumen Kakanakov^a, Tetiana Cholakova^a, Stefan Kolchev^a, Chavdar Pashinski^{ab}

^aCentral Laboratory of Applied Physics, Bulgarian Academy of Sciences, Bld. Sankt Petersburg, 61, 4000 Plovdiv, Bulgaria, ekpepe31@gmail.com

^bDepartment of Mechanics, Technical University - Sofia, Br. Plovdiv, Tsanko Diustabanov St. 25, 4000 Plovdiv, Bulgaria

ABSTRACT

Sets of Cr-based hard coatings were prepared via reactive closed field unbalanced magnetron sputtering (CFUBMS). Substrate temperature was kept in range of 150 to 200 °C during deposition. Nanohardness (H) and effective modulus of elasticity (E^*) of the CrN, CrAlN, CrTiN and CrTiAlN coatings were examined using depth-sensing indentation method. The results from the combined examination of the research ratios showed that the triple and quaternary hard coatings have superior mechanical properties and they strongly depend on the deposition conditions.

Keywords: PVD hard coatings, mechanical properties, nanohardness, elasticity.

1. INTRODUCTION

Deposition of hard coatings on machine components and tools is an effective method of improving their performance and they expand their various applications worldwide [1]. Cr-based coatings are widely applied in industry for different applications [2,3]. Deposition temperature ranges below 200°C seriously bother the obtaining of optimal mechanical characteristics for the conventional PVD coatings. Different heat sensitive industrial materials like cold working alloyed steels, copper alloys, die steels, polymers, etc. [4] could improve their exploration time if hard coatings with optimal mechanical properties are deposited at these lower temperatures.

Magnetron sputtering has been applied for a long time as an effective method of physical vapour deposition of thin films [5]. Closed magnetic field, generated by unbalanced magnetrons effectively improves coating quality. This technology popular as Close Filed Unbalanced Magnetron Sputtering (CFUBMS) [6] could be used for deposition of Cr-based coatings under 200°C.

The nanohardness of the materials characterised their resistance to plastic deformation [7], while elastic module describes the resistance of a certain material to elastic deformation [8]. These parameters are easy to obtain via instrumented nanoindentation on very fine scale.

The focus of this research is the investigation of the nanohardness and module of elasticity of Cr-based hard coatings, deposited via CFUBMS at low temperatures and intended for real industrial applications.

2. EXPERIMENTAL DETAILS

All of the coatings were deposited onto hardened high-speed steel (HSS) substrates type EN 1.3343 via CFUBMS. The process was carried out with four rectangular magnetrons two of them Ti, one Cr and one Al all of them of high purity (99,999%). Current in the range 0.5-8 A was applied to the targets in DC regime for the Ti and Cr targets and in pulsed regime (150 kHz, 1500 ns) to the Al target. The substrates were degreased and dried prior to the deposition process.

The Ar flow of 25 sccm was controlled by mass flow controller (MFC). The nitrogen flow, also controlled by MFC was varying between 15 and 30 sccm. The working pressure was maintained between 0.19 to 0.36 Pa, correspondingly. The rate of the samples holder was kept at 5 rpm. Prior to deposition the samples were cleaned in Ar plasma for 30 minutes at a bias voltage of -500 V for removing contaminants from the substrate surface. Bias voltage of -70 V was applied to the samples and the substrate temperature was in diapason of 150 to 200°C during all of the deposition processes.

Nine Cr-based coatings were deposited with different ratio of contained metals and nitrogen: Cr, CrN, CrAlN, CrTiN and CrTiAlN.

The triple and quaternary coatings were deposited with Cr adhesive layer (~ 0.1 μm) and CrN transition layer (~ 0.2 μm).

The mechanical properties of the coatings were characterised via depth sensing method appropriate for characterization of the nanohardness and module of elasticity [9]. A Nanoindentation Hardness Tester (NHT) (Anton Paar), equipped with a diamond Berkovich indenter was used. The applied load was in range of 10 to 20 mN. The maximum penetration depth is chosen to be between 10% and 25% of the total coating thickness to avoid the substrate influence [10,11]. Indentation depths lower than 10% of the coating thickness is not recommended because they will lead to an increase in the Indentation Size Effect [12]. The hardness and the elastic modulus were calculated, applying the method, proposed by Oliver and Pharr [10,11].

3. RESULTS AND DISCUSSION

The calculated values of nanohardness (H) and effective elastic modulus (E*) are shown in *Table 1*. The coating mechanical properties were examined by the application of different load, chosen in the range of 10 to 20 mN for each sample depending on its thickness.

Table 1. Mechanical properties of the substrate and the coatings.

#	Coating	H, [GPa]	E*, [GPa]
1	Cr	8.1	295
2	CrN	17.9	383
3	CrAlN(1)	19.1	368
4	CrAlN(2)	20.1	279
5	CrTiN(1)	27.4	272
6	CrTiN(2)	29.9	392
7	CrTiAlN(1)	39.1	374
8	CrTiAlN(2)	32.4	399
9	CrTiAlN(3)	30.5	358
10	HSS substrate	11.5	274

During the nanoindentation any significant cracks were not detected in the load-displacement curves. Improved mechanical properties of the coatings, compared to HSS substrate were obtained.

Fig. 2 presents nanohardness and effective modulus of elasticity of the examined coatings and of the bare substrate.

The measured value of the Cr layer 8 GPa is near to the values cited in the literature in range of 11-14 GPa. The CrN hard coating show higher nanohardness of 18 GPa because of the formation of nitride phase that could increase the nanohardness even to 28 GPa [13,14]. For the triple and quaternary hard coatings are measured higher values of nanohardness supported from the including of Ti and Al in their composition [15]. The nanohardness of the CrAlN hard coatings is 19-20 GPa and this value depends strongly on the deposition conditions as the nanohardness of CrAlN coatings could be also in a wide range: 15-36 GPa [16].

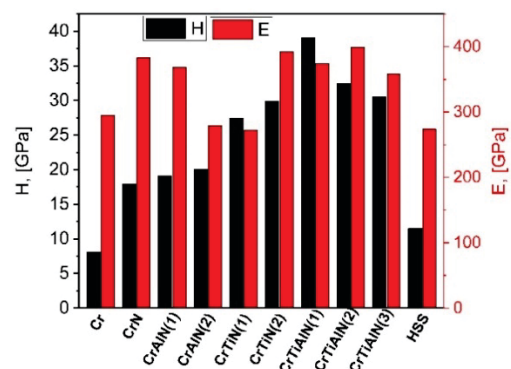


Fig. 1. Nanohardness and modulus of elasticity.



The CrTiN coatings are characterized with nanohardness between 27-30 GPa identical with the reported values for CrTiN coatings between 25-29 GPa [17]. The superior nanohardness of this group of Cr-based hard coatings is seen for the CrTiAlN coatings measured between 30-39 GPa compatible with the value of 35 GPa reached from other researchers [17]. The nanohardness values of the different coatings compared to each other shown that their mechanical properties strongly depend on the process conditions like target current, nitrogen flow and working pressure. The measured values of modulus of elasticity for the different layers are as follows: Cr (~300 GPa), CrN (~380 GPa), CrAlN (~280-370 GPa), CrTiN (~270-390 GPa) and CrTiAlN (~360-400 GPa). It seen that even hard coatings with similar hardness could also have a different modulus of elasticity and the main contributing factor for this result is the variation in their chemical composition [18]. As a conclusion, the nanohardness and modulus of elasticity are improved for the ternary and quaternary Cr-based coatings compared to the substrate and the binary CrN coatings.

5. CONCLUSIONS

The nanohardness and module of elasticity are studied for Cr-based hard coatings deposited at temperatures under 200°C. The results show that independently of the lower deposition temperature the mechanical properties of the researched coatings are comparable with the cited in literature for this class of coatings. The highest nanohardness is measured for the CrTiAlN hard coatings. The module of elasticity strongly depends on the composition of the hard coatings.

The results of the measured nanohardness H and module of elasticity E could be used for investigation of the different H to E ratios and the different tribological and fracture resistance properties to be identified, which is our next research go.

Acknowledgements: This work was supported by the European Regional Development Fund within the OP “Science and Education for Smart Growth 2014 – 2020”, Project CoC “Smart Mechatronic, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies”, № BG05M2OP001-1.002-0023.

REFERENCES

- [1] Ilieva M. Obtaining and investigation of hard, wear-resistant protective chrome-based coatings, PhD Thesis, “Angel Kanchev” University of Rousse, Rousse, 2011.
- [2] Navinšek B. Industrial application of CrN (PVD) coatings, deposited at high and low temperatures. Surface and Coatings Technology 1997; 97 (1-3): 182-191.
- [3] Aouadi S.M, Schulze D.M. Growth and characterization of Cr₂N/ CrN multilayer coatings. Surface and Coatings Technology 2001; 140(3): 269-277.
- [4] Doudlas D. Lower Deposition Temperature PVD Coatings Allow for Greater Choice in Mold Materials. MoldMaking Technology 2008, available at Lower Deposition Temperature PVD Coatings Allow for Greater Choice in Mold Materials | MoldMaking Technology
- [5] Gudmundsson J.T. Physics and technology of magnetron sputtering discharges. Plasma Sources Science and Technology 2020; 29 (11).
- [6] Deng Y, Wanglin C. Physical vapour deposition technology for coated cutting tools: A review 2020; 46 (11):18373-18390.
- [7] T. Clyne, J. Campbell, Testing of the plastic deformation of metals, Cambridge University Press, 2021, <https://doi.org/10.1017/9781108943369>
- [8] Tushinsky L, Kovensky I, Plokhov A, Sindeyev V, Reshedko P. Mechanical properties of coatings. In: Coated metal. Engineering materials, Springer, 2002, DOI: 10.1007/978-3-662-06276-0_2.
- [9] Xiao H., Theoretical model for determining elastic modulus of ceramic materials by Nanoindentation. Materialia 2021; 17.
- [10] Oliver W.C. Pharr, G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing



indentation experiments. Journal of Material Research 1992; 7: 1564–1583.

[11] Pharr G.M, Oliver W.C. Measurement of Thin Film Mechanical Properties, Using Nanoindentation. MRS Bulletin 1992;17(7): 28-33.

[12] X. Li, W. Zhang, M. Ham, F. Xie, D. Li, J. Zhang, B. Long, Indentation size effect: an improved mechanistic model incorporating surface undulation and indenter tip irregularity, Journal of materials research and technology, vol. 23, p. 143-153, 2023

[13] Hviščová P, Lofaj F, Novak M. Nanohardness of CrN coatings versus deposition parameters. Key Engineering Materials 2014; 606: 191-194.

[14] Hviščová P, Lofaj F, Novak M. The influence of deposition conditions on the nanohardness and scratch behaviour of thin DC magnetron sputtered CrN coatings. Powder Metallurgy Progress 2013; 13 (3-4): 175-178.

[15] Mohammadpour E, Jiang Z-T, Altarawneh M, Xie Z, Zhou Z-f, Mondinos N, Kimpton J, Dlugowski B. Estimation of high temperature

mechanical properties of CrN and CrAlN coatings from in-situ Synchrotron Radiation X-ray diffraction. in Asia Oceania forum for synchrotron radiation research, 25-27 November, National centre for synchrotron science 2015.

[16] Benlatreche Y, Nouveau C, Aknouche H, Imhoff L, Martin N, Gavaille J, Rousselot C, Rauch J-Y, Pilloud D. Physical and mechanical properties of CrAlN and CrSiN ternary systems for wood machining applications. Plasma Processes and Polymers 2009; 6 (S1): S113-S117.

[17] Sharear Kabir M, Munroe P. Structure and mechanical properties of graded Cr/CrN/CrTiN coatings synthesized by close field unbalanced magnetron sputtering. Surface and Coatings Technology 2017; 309:779-789.

[18] Musil J, Kunc F, Zeman H. Relationships between hardness, Young's modulus and elastic recovery in hard nanocomposite coatings. Surface and Coatings Technology 2002; 154 (2-3): 304-313.



ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА УМОРНОТО ПОВЕДЕНИЕ НА ОБРАЗЦИ СЪС СКРЕПИТЕЛНИ ОТВОРИ В АЛУМИНИЕВА СПЛАВ 2024-T3, ПОДЛОЖЕНИЕ НА СТУДЕНО РАЗШИРЕНИЕ ЧРЕЗ МОДИФИЦИРАН SPLIT MANDREL МЕТОД

FATIGUE BEHAVIOR EXPERIMENTAL STUDY OF SPECIMENS WITH FASTENER HOLES IN 2024-T3 ALUMINUM ALLOY SUBJECTED TO COLD EXPANSION VIA MODIFIED SPLIT MANDREL METHOD

Angel Petrov Anchev

Technical University of Gabrovo

Vladimir Petrov Dunchev

Technical University of Gabrovo

Petya Hristoforova Daskalova

Technical University of Gabrovo

Abstract

The object of this study is a new cold hole expansion method in terms of evaluating its effectiveness in improving the fatigue life of 2024-T3 aluminum alloy. The new method is a modified version of the existing split mandrel cold working. The new method ensures the same tightness in the conditions of a relatively wider tolerance of the previously drilled hole diameter. The evaluation of the new method effectiveness was made via fatigue tests with a pulsating tensile cycle using flat specimens with central holes. Four groups of specimens were tested. The holes of the first group of specimens were drilled and finally reamed. The holes of the remaining three groups of samples were successively drilled in the conditions of relatively large scattering of the diameters, cold worked and finally reamed. The obtained S-N curves prove the novel method effectiveness for significantly increasing the fatigue life (up to four times) compared to the conventional case of hole processing with cutting only. The application of the proposed method in the conditions of a relatively large scattering of the diameters of the pre-machined holes leads to an insignificant change of the number of cycles to failure with the same applied remote stress.

Keywords: 2024-T3 aluminum alloy; cold hole expansion; modified Split Mandrel Method; S-N curves; pulsating cycle

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Следствие от доминиращото динамично натоварване, умората на металите е феномен, който типично се проявява във всички видове транспорт – автомобилен, въздушен, жп транспорт и морски. Показателен факт е, че относителният дял на уморните разрушения в самолетостроенето е 50-90 % от всички повреди на компонентите [1]. До голяма степен това се дължи на многобройните скрепителни отвори в летателните апарати, които са естествени концентратори на напрежения и деформации. Предпочитани

материали в самолетостроенето са високояките алуминиеви сплави поради съчетанието от висока статична и динамична якост с ниска масова плътност. Такъв материал е алуминиева сплав 2024-T3.

Доказано ефективен подход за повишаване на уморната дълготрайност (УД) на компоненти с отвори в жилаво-пластични материали, в т.ч. и алуминиева сплав 2024-T3, е концепцията студено разширение (СР) на отворите. В основата ѝ е идеята за въвеждане на полезни остатъчни макро-напрежения на натиск около отворите преди въвеждане на компонентите в експлоатация, развита и патентована от компанията Boeing за



приложения в аероиндустрията [2]. Ефективността на методите за СР посредством преминаващ по направление на оста на отворите деформиращ елемент със стегнатост е утвърдена в практиката. От тях най-голямо практическо приложение има методът Split Sleeve Cold Expansion (SSCE) [2, 3], който използва инструмент, включващ монолитен конусно-цилиндричен дорн, около който се поставя разрязана тънкостенна втулка от неръждаема стомана. Процесът на СР се осъществява чрез изтеглянето на дорна обратно през разрязаната втулка-посредник, в резултат на което материалът около отвора пластифицира, а по-отдалечените слоеве се деформират еластично. След изваждане на дорна, втулката за еднократна употреба се изхвърля, а провлачилият материал около отвора се оказва натиснат следствие естествения стремеж на еластично деформираните слоеве да се върнат в първоначалното си състояние. Hogenhout (1986) разработва метода Split Mandrel Cold Working (SMCW) [4] за приложение в аероиндустрията като алтернатива на необходимостта от скъпо струваща втулка-посредник. Инструментът, използван при метода SMCW, включва кух надлъжно разрязания на четири части дорн, който след като се въведе в отвора, се „втвърдява“, достигайки работния си диаметрален размер следствие от осово преместване на щифт, разположен в централен отвор на дорна. Процесът СР се осъществява при изтегляне на „втвърдения“ дорн през отвора. Методите SSCE и SMCW имат обща основа – и двата процеса се реализират с едностранен достъп, а процесът на СР по същество съответства на размерен процес. Степента на СР на отвора DCE (Degree of Cold Expansion) се определя единствено от диаметралните размери на дорна при SSCE или на дорна и щифта при SMCW, както и от диаметъра на предварително пробития и райберован отвор. Затова зададената със съответен допуск стегнатост се осигурява чрез контрол по геометричен

критерий (чрез калибри), както на диаметъра на предварително пробития отвор, така и на работната част на дорна срещу износване. Необходимостта от голям брой контролни операции и тесния допуск на диаметралния размер на предварително обработените отвори повишава цената на обработката. За елиминиране на тези недостатъци, Максимов и Дунчева изобретяват нов метод за СР [5], който по същество е модификация на метода SMCW. Модифицирания SMCW метод осигурява една и съща стегнатост в условията на относително по-широк допуск на диаметралния размер на предварително обработените отвори, респ. процесът на СР не е размерен процес.

Развитието на изследванията през последните години са свързани с използването на нови подходи за въздействие върху материала около отворите – предимно чрез електро-магнитно въздействие [6-8] и последователно лазерно текстуриране и механично въздействие върху отвора чрез ротиращ деформиращ елемент [9]. Независимо от вида на приложеното въздействие, целта на различните методи е една и съща – въвеждане на полезни остатъчни напрежения на натиск около отворите. Познаването на профила на остатъчните напрежения около отворите е важна основа за предсказване на УД на компонентите, но само по себе си не е доказателство за ефективността на даден подход. Безспорен количествен критерий за ефективност са резултатите, получени на база на уморни тестове [10-19]. Липсват такива експериментални изследвания на модифицирания SMCW метод.

Целта на настоящото изследване е да се оцени ефективността на модифицирания SMCW метод по отношение на повишаване на УД на алуминиева сплав 2024-T3 във вид на лист в условията на относително голямо разсейване на диаметрите на предварително обработените отвори. Оценката на уморното поведение е направена на база на уморни тестове на пулсиращ цикъл и S-N криви.



2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДИ

2.1. Материал

Материалът е алуминиева сплав 2024-T3 във вид на лист с дебелина 5 mm с химичен състав, показан в Табл. 1.

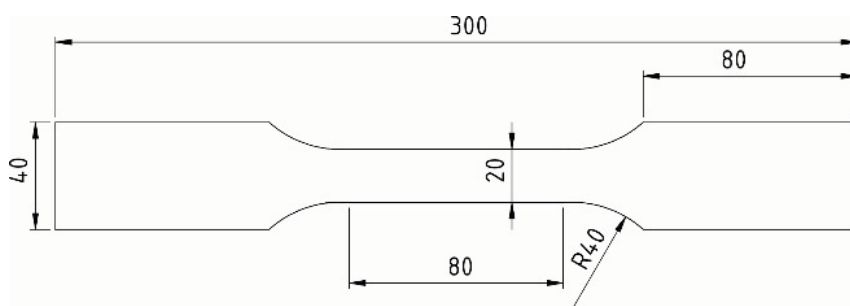
Химичен състав на 2024-T3 във вид на прът

Таблица 1

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr
94.53	0.784	0.445	1.62	0.79	1.48	0.0176	0.0169
Ni	Ti	Be	Ca	Li	Pb	Sn	Sr
0.0115	0.0485	<0.0001	<0.0001	0.0026	0.126	0.0077	0.0004
V	Na	Bi	Zr	B	Ga	Cd	Co
0.0108	0.0024	<0.005	0.0115	<0.0005	0.022	<0.0010	<0.0020
Ag	Hg	In	Sb	Ce	La	Mo	Sc
0.0011	0.0052	0.0113	0.132	0.0172	0.0052	0.0026	<0.0005

Механичните характеристики на изследваната алуминиева сплав са обобщени на базата на експеримент на едномерен опън на плоски образци. Изпитанията са проведени върху изпитвателна машина за

статични и динамични изследвания Zwick/Roell Vibrophore 100. Геометрията на образците е показана на фиг. 1а, а общия им вид – на фиг. 1б.



а.



б.

Фиг. 1. Експериментален образец за тест на опън

За да се оцени ефекта от наличието на централен отвор, механичните изпитания на едномерен опън са проведени за два случая – без и с наличие на централен отвор с номинален диаметър $\varnothing 8.5$ mm. Очевидно,

наличието на централен отвор с посочения диаметър оказва подчертано слабо влияние върху механичното поведение на изследваната алуминиева сплав при статично натоварване (Табл. 2).



Механични характеристики на 2024-T3 без и с отвор

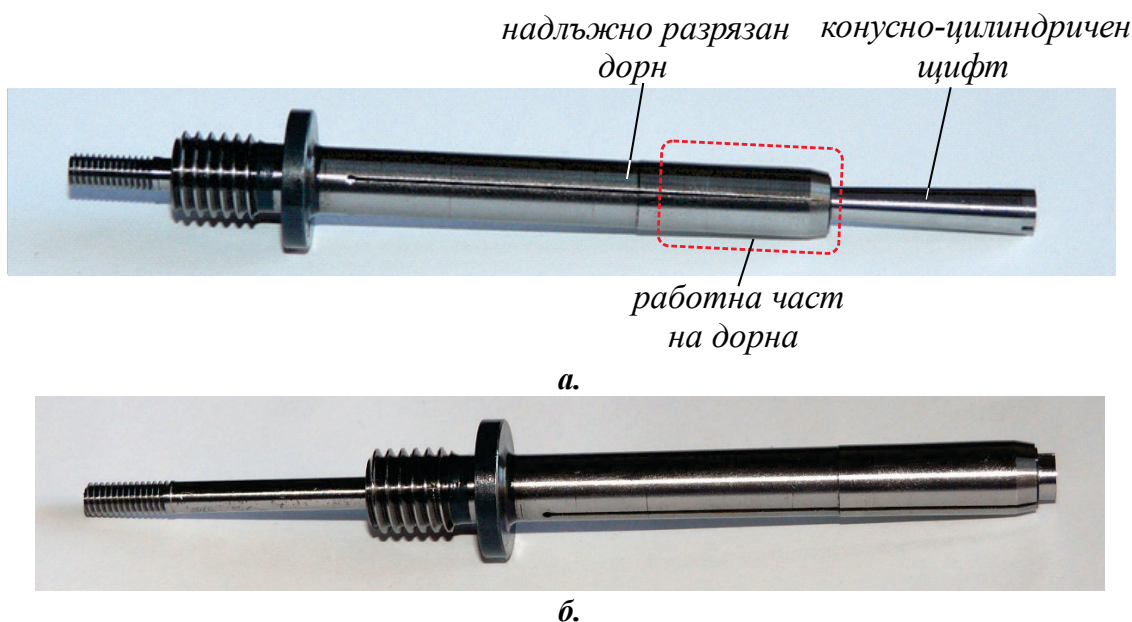
Таблица 2

	$R_{0,2}$, МПа	R_m , МПа	A_5 , %
Без отвор	319	430	17,5
С отвор	331	429	10,5

2.2. Инструмент и устройство, реализиращи модифицирания SMCW метод

Детайлна информация относно същността на модифицирания е дадена в [РСТ]. Инструментът за СР на отвори включва включва частично надлъжно SMCW метод разрязан на четири части дорн (фиг. 2а), т.е. оформени са четири симетрични сегмента. В осов отвор на дорна е позициониран конусно-цилиндричен осово подвижен щифт (фиг. 2а). Работната част на дорна включва две конусни повърхнини, свързани помежду си с цилиндрична повърхнина (чийто диаметър е равен на максималния диаметър

на отворите, подлежащи на СР). Конусната повърхнина на щифта влиза в контакт с повърхнината на конусен отвор, изработен в разрязания край на дорна, като двете конусни повърхнини имат един и същ ъгъл на наклана. Работната конусна повърхнина на работната част на дорна преминава в цилиндрична повърхнина, по която се установява отвора, подлежащ на СР. Инструментът (фиг. 2) осигурява постоянна стегнатост, тъй като тя зависи само от геометричните параметри на работната част на дорна – $i = const = 0.32 \text{ mm}$.



Фиг. 2. Инструмент за СР, реализиращ модифицирания SMCW метод

Съгласно изобретението, процесът на СР стартира след компенсиране на хлабината между цилиндричната установъчна повърхнина на разрязания дорн и повърхнина-

та на отвора. Компенсирането се осъществява чрез относително осово движение на щифта по отношение на разрязания дорн. Хлабина съществува за всички третиран



отвори, с изключение на тези, обработени на горната граница на диаметралния размер. Гаранция за финализиране на етапа на компенсиране на хлабината е достигането на плътен контакт между следните три елемента: конусно-цилиндричния щифт,

разрязания дорн и образеца с отвор, подлежащ на СР.

На фиг. 3 е показан общ вид на хидравличното задвижващо устройство и инструмента, реализиращи модифицирания SMCW метод.



Фиг. 3 Общ вид на устройството и инструмента за СР, реализиращи модифицирания SMCW метод

2.3. Експериментални уморни образци

Експерименталните уморни образци са с геометрични параметри съгласно фиг. 1а с централен отвор. Обект на уморни изпитания са четири групи образци, различаващи се по начина на третиране на отворите:

- I^{ва} референтна група – отворите са диаметър $d_o = 8.5 \text{ mm}$ и обработени чрез рязане (използвайки интерполация) върху фрезов обработващ център. Показани са на фиг. 3а;

- II^{ра} група – отворите са обработени в следната последователност: чрез рязане върху фрезов обработващ център до диаметър $d_o = 8.0 \text{ mm}$, СР и финално райбероване до диаметър $d = 8.5 \text{ mm}$ (фиг. 3б). Отворите от тази група са третиращи със степен на студено разширение $DCE = \frac{i}{d_o} = 0.04 \times 100 = 4 \%$.

- III^{та} група – отворите са обработени в следната последователност: чрез рязане върху фрезов обработващ център до диаметър

$d_o = 8.1 \text{ mm}$, СР и финално райбероване до диаметър $d = 8.5 \text{ mm}$ (фиг. 3б). Отворите от тази група са третиращи със степен на студено разширение $DCE = \frac{i}{d_o} = 0.0395 \times 100 = 3.95 \%$.

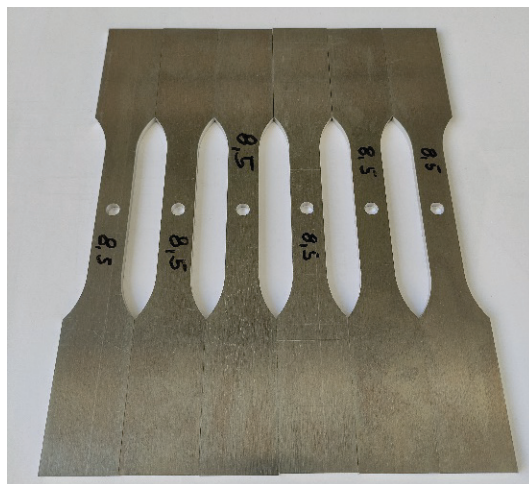
- IV^{та} група – отворите са обработени в следната последователност: чрез рязане върху фрезов обработващ център до диаметър $d_o = 8.2 \text{ mm}$, СР и финално райбероване до диаметър $d = 8.5 \text{ mm}$ (фиг. 3б). Отворите от тази група са третиращи със степен на студено разширение $DCE = \frac{i}{d_o} = 0.039 \times 100 = 3.9 \%$.

В съответствие с горното се обезпечава един и същи финален диаметър на отвора, т.е. едно и също критично сечение на уморните образци от всички групи. Описаното групиране на уморните образци дава възможност да се направят следните сравнителни оценки: 1). Да се оцени ефекта от прилагане на модифицирания метод за СР

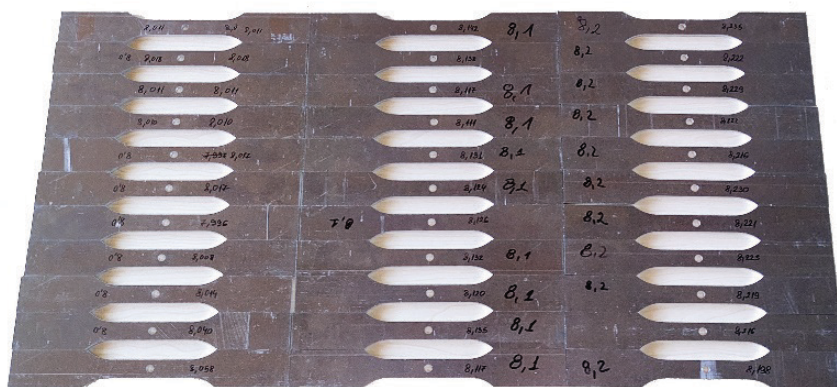


на база на сравнение на II-ра, III-та и IV-та групи с I-ва група, т.е. с конвенционалния случай на обработване на отворите само чрез

рязане; 2). Да се оцени ефекта от разсейването на предварително обработените отвори преди СР върху уморното им поведение.



а.



б.

Фиг. 3. Експериментални образци за уморни тестове

В съответствие с горното се обезпечава един и същи финален диаметър на отвора, т.е. едно и също критично сечение на уморните образци от всички групи. Описаното групиране на уморните образци дава възможност да се направят следните сравнителни оценки: 1). Да се оцени ефективността на модифицирания метод за СР на база на сравнение на II-ра, III-та и IV-та групи с I-ва група, т.е. с конвенционалния случай на обработване на отворите само чрез

рязане; 2). Да се оцени ефекта от разсейването на предварително обработените отвори преди СР на база на сравнение на уморното поведение на образци от II-ра, III-та и IV-та групи.

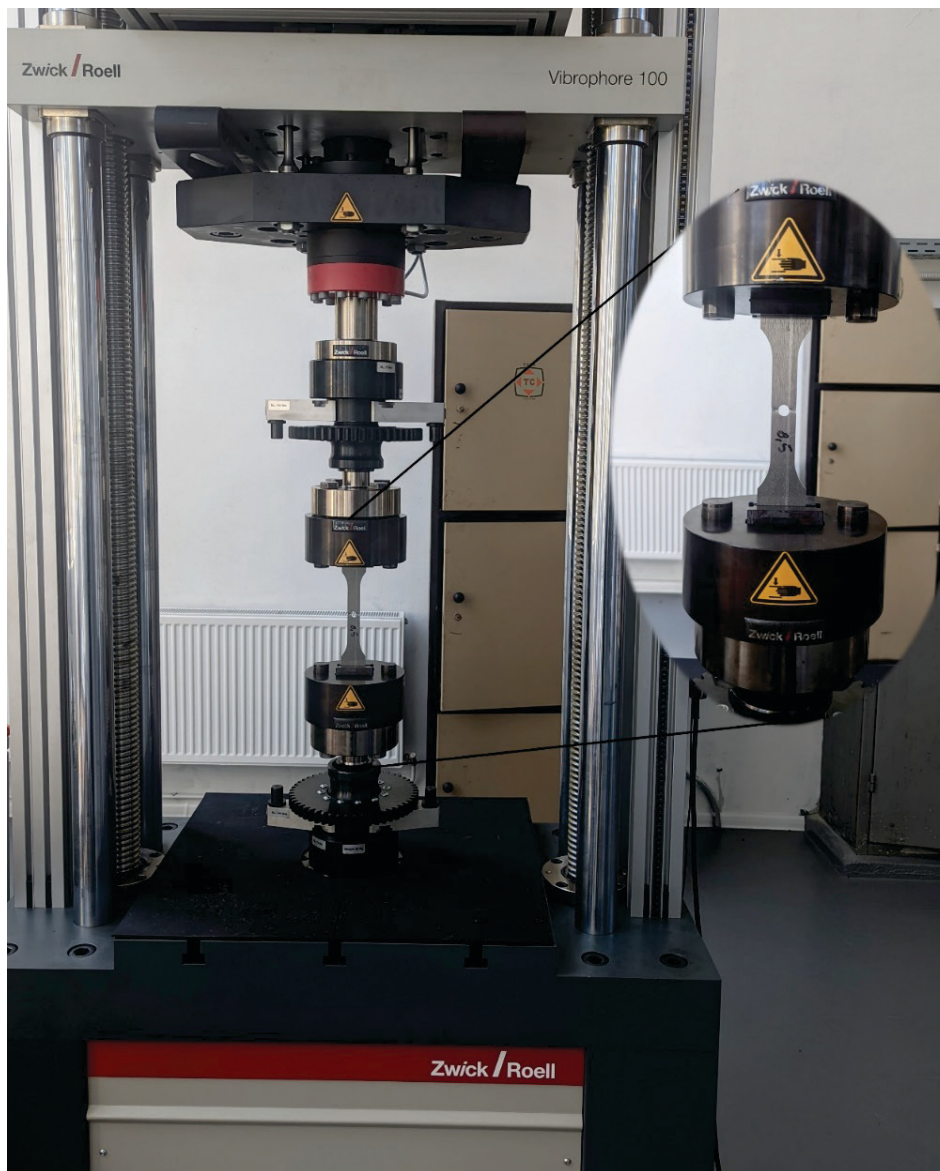
СР на образците е направено за една и съща ориентация в окръжно направление на разрезания дорн – инструментът е разположен така, че равнината на застрашеното сечение да съвпада с равнината на симетрия на който да е сегмент.



2.4. Уморни тестове

Уморното поведение на образците от всяка група е изследвано чрез уморни тестове на

пулсиращ цикъл върху изпитвателна машина Zwick/Roell Vibrophore 100 (фиг. 4).

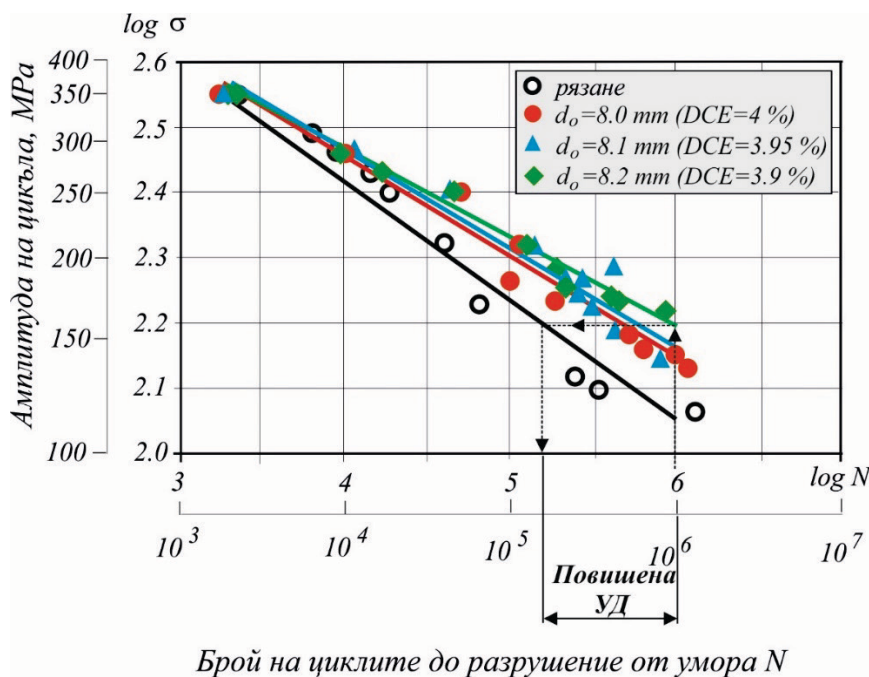


Фиг. 3. Изпитателна машина Zwick/Roell Vibrophore 100 в динамичен режим за работа

Уморните тестове са проведени с честота, съответстваща на избрана резонансна честота от изпитвателната машина. Експерименталните резултати за всички групи са обобщени във вид на S-N криви.

3. Резултати и коментари

Получените за четирите групи експериментални образци S-N криви са показани на фиг. 4 в логаритмичен мащаб.



Фиг. 4. S-N криви

S-N кривите показват следните тенденции:

- Налице е значително подобряване на уморното поведение на трите групи образци, чиито отвори са подложени на СР в сравнение с референтната група образци. Това доказва ефективността на модифицирания SMCW метод за повишаване на УД – за образците от IV^{-та} група повишението е с около 750 000 цикъла (4 пъти) (фиг. 4);

- Като цяло, наблюдава се близко разположение на S-N кривите, съответстващи на образците от II^{-ра}, III^{-та} и IV^{-та} групи, чиито отвори S-N кривите са подложени на СР. Това потвърждава ефективността на модифицирания SMCW метод в условията на относително голямо разсейване на предварително обработените отвори;

- Забелязва се определена тенденция за изменение на наклона на S-N кривите в корелация с номиналния диаметър на предварително обработените чрез рязане отвори. Независимо, че степенята на СР има най-голяма стойност за образците от II^{-ра} група (DCE = 4 %), съответстващата им S-N крива показва тенденция към най-ниска стойност

на якостта на умора при 10^6 цикъла в сравнение с тези за III^{-та} и IV^{-та} групи. Най-голяма УД се наблюдава при образците от IV^{-та} група, чиито предварително обработени отвори имат най-голям номинален диаметър. Тези резултати се дължат в по-голяма степен на ефекта от преразпределение на полезните остатъчни напрежения вследствие от отстраняването на слой метал с различна дебелина след финалното райбероване.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено е сравнително експериментално изследване на уморното поведение на плоски образци с отвори от високояка алуминиева сплав 2024-T3, обработени само чрез рязане и такива, подложени на СР чрез модифициран SMCW метод в условията на относително голямо разсейване на диаметрите на предварително обработените отвори. Получените в резултат на уморни тестове на пулсиращ опънов цикъл S-N криви потвърждават следното:

- Доказана е ефективността на модифициран SMCW метод за значително повишаване на УД (до 4 пъти) в сравнение с кон-



венционалният случай на обработване на отворите само с рязане;

● Прилагането на модифициран SMCW метод в условията на относително голямо разсейване на диаметрите на предварително обработените отвори не води до съществена промяна в уморното поведение. Това потвърждава успешната реализация на новия метод за СР като неразмерен процес.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Abdelkrim Aid, Zahar Semari, Mohamed Benguediab, Finite Element Method Investigation of the Effect of Cold Expansion Process on Fatigue Crack Growth in 6082 Aluminum Alloy. Modeling and Numerical Simulation of Material Science (2014) 4 25-31

[2] Champoux L. A. Coldworking Method and Apparatus. USA Patent 3566662, Patented March 2, 1971

[3] Quincey D. E., Copple C. M., Walsh W. B., Jarzbowicz R. Z., Easterbrook E. T. Split sleeve cold expansion. USA Patent 5305627, Patented Apr. 26, 1994

[4] Hogenhout F. Method and apparatus for hole coldworking. USA Patent 4583388, Patented April 22, 1986

[5] Maksimov YT, Dunchева GV, Device and tool for cold expansion of holes. International Publication Number WO 2014/012153 A1, January 2014

[6] Zhou Z., Fu J., Cao Q., Lai Z., Xiong Q., Han X., Li L. (2017) Electromagnetic cold-expansion process for circular holes in aluminum alloy sheets. Journal of Materials Processing Tech. 248 49-55

[7] Geng H., Xu X., Lai Z., Cao Q., Li L. (2022) A novel non-contacting single-coil electromagnetic hole expansion process to improve the fatigue performance of hole component. International Journal of Fatigue 162 106924

[8] Guo Z, Zengqiang C, Yangjie Z, A dynamic cold expansion method to improve fatigue performance of holed structures based on electromagnetic load. International Journal of Fatigue 148 (2021) 106253

[9] Cao X., Zhang P., Liu S., Lei X. L., Wang R. Z., Zhang X. C., Tu S. T. (2020) A novel hole cold-

expansion method and its effect on surface integrity of nickel-based superalloy. Journal of materials Science & Technology 59 129-137

[10] Maximov JT et al A novel method and tool which enhance the fatigue life of structural components with fastener holes. Engineering Failure Analysis (2013) 31:132-143

[11] Yucan F., Ende G., Honghua S., Jiuhua X., Renzberg L. (2015) Cold expansion technology of connection holes in aircraft structures: A review and prospect. Chines Journal of Aeronautics 28 (4) 961-973

[12] Dunchева GV, Maximov JT, Ganев N. A new conception for enhancement of fatigue life of large number of fastener holes in aircraft structures. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures (2016) 00 1-13

[13] Kumar S. A., Babu N. C. M. (2017) Influence of induced residual stresses on fatigue performance of cold expanded fastener holes. Materials Today: Proceedings 4 2397-2402

[14] Yan-Li W., You-Li Z., Shuai H., Han-Xiao S., Young Z. (2017) Investigation on fatigue performance of cold expansion holes of 6061-T6 aluminum alloy. International Journal of Fatigue 95 216-228

[15] Yasniy P., Glado S., Iasnii V. Lifetime of aircraft alloy plates with cold expanded holes. International Journal of Fatigue (2017)104 112-119

[16] Chikmath L., Ramanath M. N., Dattaguru B. (2019) Fatigue life benefits of cold worked holes in fastener joints. Procedia Structural Integrity 14 922-929

[17] Liu H., Hu D., Wang R., Wang X., Jin S., Gu Y. (2020) Experimental and numerical investigations on the influence of cold expansion on low cycle fatigue life of bolt holes in aeroengine superalloy disk at elevated temperature. International Journal of Fatigue 132 105390

[18] Wang X., Xu C., Chen X., Hu D., Hu B., Hu R., Gu Y., Tang Z. (2021) Effect of cold expansion on high-temperature low-cycle fatigue performance of the nickel-based superalloy hole structure. International Journal of Fatigue 151 106377

[19] Wang C., Zou F., Zhou E., Fan Z., Ge E., An Q., Ming W., Chen M. (2023) Effect of split sleeve cold expansion on microstructure and fatigue performance of 7075-T6 aluminum alloy holes. International Journal of Fatigue 167 107339.



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

**PROSPECTS FOR DEVELOPMENT OF LABORATORY 7.5
"INTELLIGENT ENERGY SAVING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES"
AT THE CC "INTELLIGENT MECHATRONIC, ECO AND ENERGY
SAVING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES"**

Georgi Ganev

*Technical University – Sofia,
Plovdiv branch*

Stanimir Stefanov

*Technical University – Sofia,
Plovdiv branch*

Abstract

The report presents the concept of research laboratory 7.5 "Intelligent energy-saving systems and technologies" at the Competence Center "Intelligent mechatronic, eco- and energy-saving systems and technologies" financed through the Operational Program "Science and Education for Intelligent Growth" 2014-2020". The equipment provided for delivery has been reviewed. One of the mock-ups - Demonstration mock-up for testing photovoltaic panels, its construction, some of its parameters and the possibilities of conducting research with it is examined in detail.

Keywords: Intelligent energy-saving systems

ВЪВЕДЕНИЕ

Лаборатория 7.5 „Интелигентни енергоспестяващи системи и технологии“ към Центъра за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии" е една от специализираните лаборатории предвидени за изграждане в центъра за компетентност. Проектът се финансира чрез Оперативна програма „Наука и образование за интелигентен растеж“ 2014-2020“.

Водещата идея при създаването 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 енергия от конкретния консуматор или група консуматори. Въз основа на анализа на получените данни трябва 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.

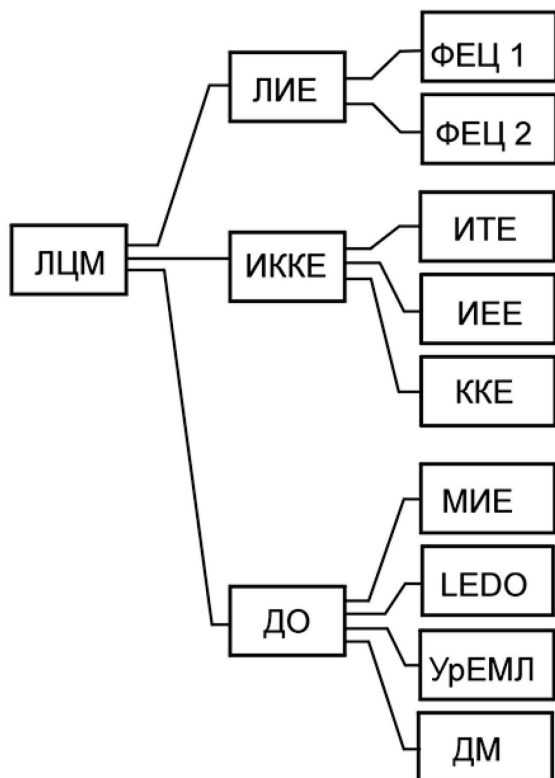
ИЗЛОЖЕНИЕ

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

Предвидено е изграждането на локален център за мониторинг (ЛЦМ) в който да се събира и обобщава информацията за разпределението на енергийните потоци в изследваните обекти. Изследвани обекти са потре-



бители с различни товарови графици. В началния етап на развитие на системата, като такива може да се използват учебните корпуси и студентското общежитие на ТУ-София, филиал Пловдив.



Фиг. 1. Концепция за лаборатория 7.5

Локалните източници на енергия (ЛИЕ) са два, монтирани в два от учебните корпуси. Единият ЛИЕ е фотоволтаична система (ФЕЦ1) с мощност 22 kWp и прилежащото ѝ оборудване: 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 (ФЕЦ2) с мощност 5,5kWp и един еднофазен мрежови инвертор с мощност 5kW. ФЕЦ2 се разполага в друг от учебните корпуси на ТУ-София, филиал Пловдив.

Втората група оборудване, предвиденото за доставка е предназначено за измерване и

контрол на консумираната енергия (ИККЕ). То включва широк спектър от измервателни устройства – ултразвукови топломери за измерване на топлинна енергия (ИТЕ), еднофазни и трифазни електромери за измерване на електроенергия (ИЕЕ). Към тази група се включва и оборудване предназначено за контрол на консумираната енергия (ККЕ) – топло- или електроенергия: интелигентни контакти, и вентили за радиатори, сензори за температура, за осветление, за присъствие и др. Общото между тях е, че поддържат комуникационни протоколи и по-конкретно M-bus, което позволява свързването им в локални мрежи. Чрез контролери - концентратори на данни, събираните данни ще се изпращат към ЛЦМ.

Третата група, наречена допълнително оборудване (ДО), включва:

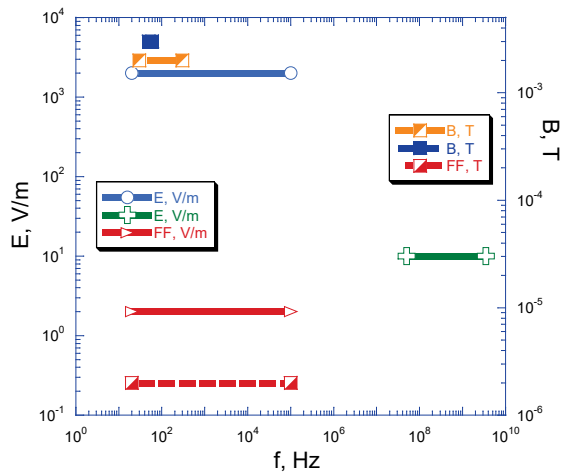
а/ Мобилен източник на енергия (МИЕ) - фотоволтаична система с мощност 3kWp с един трифазен хибриден инвертор 5kW и акумулаторна батерия 5.8kWh;

б/ LED осветители (LEDO) – това са различни осветители, включително и улични, използващи PV панели, LED източници на светлина и контролери за управлението им.

в/ Уреди за регистриране на електромагнитни лъчения (УрЕМЛ) –предвидени са за доставка различни уреди за измерване на силовите характеристики на електрически и на магнитни полета, и други параметри на околната среда. На фиг. 2 са представени някои от тях - за измерване на интензитета за електрическото поле (E) и магнитната индукция (B) и на плоско поле (FF) в зависимост от честотата на лъченията. Има и уреди за измерване на скоростта на вятъра, на слънчевата радиация и др.

г/ Демонстрационни макети (ДМ) -предвидено е проектиране, изработка и доставка на два демонстрационни макета – на ветрогенератор и на фотоволтаична система. Чрез тях ще се демонстрират възможностите за преобразуване на енергията на два типични

възобновяеми източника – вятър и слънце пред студенти, като крайната цел на тези демонстрации е приобщаването им към изследователската дейност провеждана в ЦК.



Фиг. 2. Честотен диапазон на уредите за измерване на ЕМИ

Посоченото до тук оборудване се обединява 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 компютърна техника и специализирано програмно осигуряване и оборудването за контрол на консумираната енергия (КЕЕ).

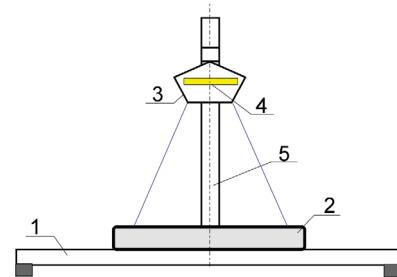
ДЕМОНСТРАЦИОНЕН МАКЕТ НА ИЗПИТВАНЕ НА ФОТОВОЛТАИЧНИ ПАНЕЛИ

Макетът е предназначен за изпитване на фотоволтаични панели с малка мощност (5W) от различен тип - монокристални (EMDE [1], TPS-1055-5W [2]) и поликристални (CL-SM5P [3], Poli-Si [4]) на различни производители В табл.1 са дадени усреднените размери на PV панели в зависимост от мощността им. Размерът на панелите и

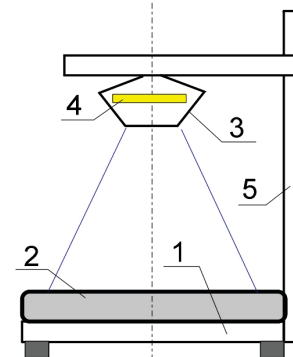
тяхната мощност са определящи за параметрите на ДМ – конструктивни размери и мощността на светлинните излъчватели.

Табл.1.

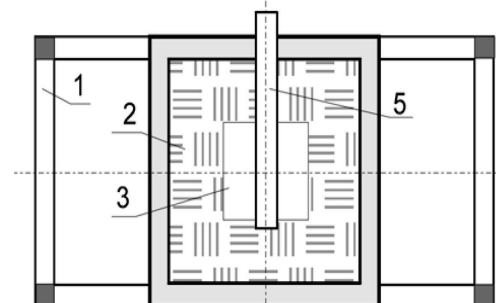
Мощност, W	Дължина, m	Широчина, m
5	0,30	0,20
10	0,35	0,26
15	0,42	0,30
20	0,44	0,36
30	0,65	0,35
40	0,55	0,51
50	0,65	0,55



а/



б/



в/

Фиг. 3. Конструкция на ДМ за изпитване на PV панели



Общият вид на предлагания макет е даден на фиг. 3. 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 (1). Размерите на основата (1) са съобразени с размерите на соларните панели. Максималният размер на панелите не трябва да надвишава 1000mm x 500mm.

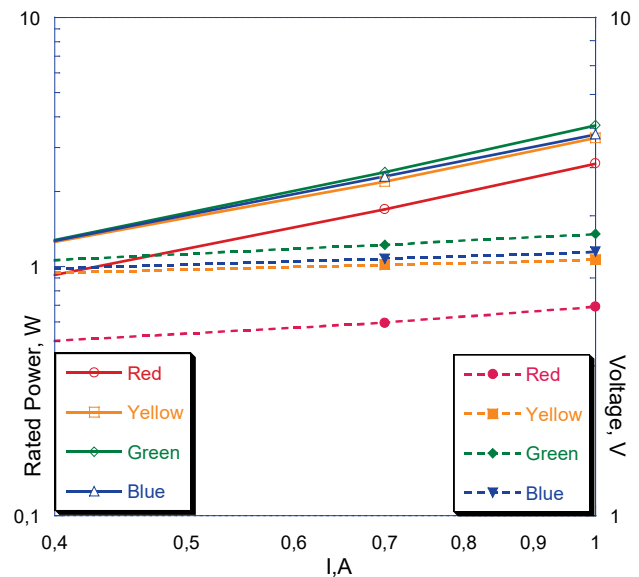
Височината на рефлектора и съответно - на източника може да се регулира, така че падащият светлинен поток да покрива цялата площ на изпитвания панел. Източникът на светлина (2) се реализира с използване на 12 светодиода тип Alustar-G20-30 [5] с предварително известни спектър, мощност и светлинен поток на излъчването – групи от по 3 червени, 3 жълти, 3 зелени и 3 сини LED (табл.2).

Табл. 2

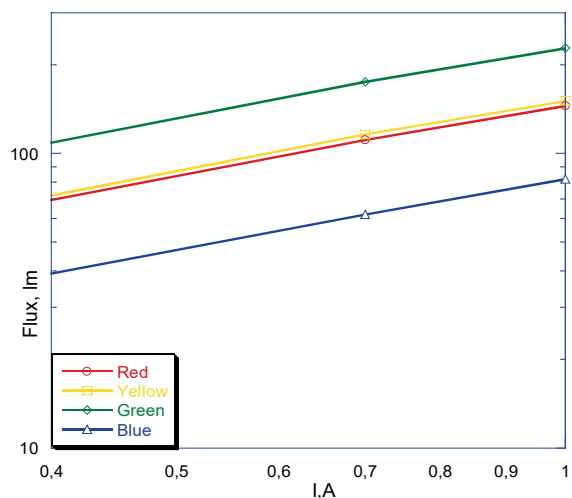
№	1	2	3	4
Дължина на вълната	625nm	590nm	528nm	475nm
Цвят на светлината	червен	жълт	зелен	син
Светлинен поток, lm	350 mA	62	64	97
	700 mA	111	116	175
	1000 mA	145	151	228
Мощност, W	350 mA	0,8	1,1	1,1
	700 mA	1,7	2,2	2,4
	1000 mA	2,6	3,3	3,7

Дължината на вълната на монохроматичното излъчване на използваните LED източници съответно е 625nm (червен), 590nm (жълт), 528nm (зелен) и 475nm (син). Светлинният поток се регулира в границите от 40% до 100% спрямо номиналния поток.

На фиг. 4 са дадени мощността и напрежението върху диодите при изменение на тока през тях. На фиг. 5 е показано изменението на светлинния поток на LED източниците при изменение на тока. Представените зависимости са построени по справочни данни на фирмата производител [5] за избраните светодиоди.



Фиг. 4. Изменение на мощността и напрежението върху LED в зависимост от протичащия ток



Фиг. 5. Изменение на светлинния поток на LED в зависимост от протичащия ток

Симулационният макет ще позволи да се демонстрира влиянието на спектъра на светлинния поток и мощността на излъчването върху работата на фотоволтаичните панели, като ще се извършва облъчване на активната повърхност на фотоволтаични панели от различен тип, имащи мощности от 5Wp до 35Wp. Изследването на работата на фотоволтаичните панели ще включва измерване на генерираната от тях електроенергия



при облъчването им с различни комбинации монохроматични лъчения имащи различна интензивност, като същевременно ще се извършва и дистанционно измерване на тяхната температура. Също така, ще се изследва тяхната енергийна ефективност на база количество светлинен поток попаднал върху цялата им повърхност или само върху определени зони от нея, както и ще се симулират промяна на наклона на панелите спрямо посоката на светлинното излъчване, засенчване, и облъчване от отразена светлина,

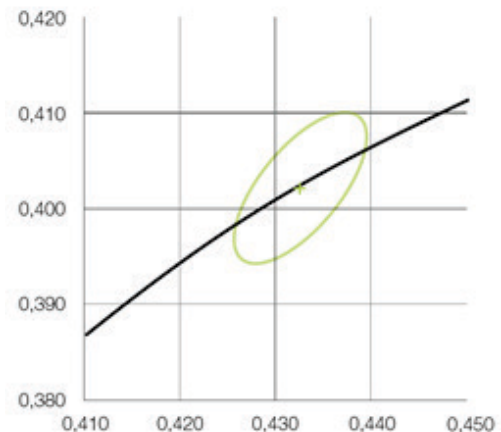
Допълнително е предвидено да се изгради подгряваща фотоволтаичните панели система с която да се регулира температурата на панелите и се симулира работа при различна температура на околната среда.

Използването на макета е свързано с разработването на енергоефективно драйвери за управление на светлинния поток на използваните LED източници с възможност за регулиране на тока (т.е. димиране) в широк диапазон.

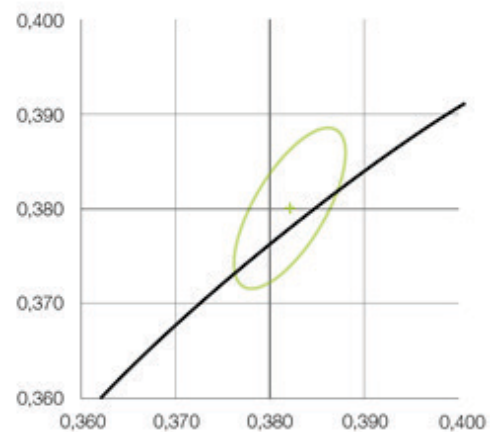
Моделът може да се развие и чрез добавяне на светодиоди с три различни вида бели светлини – топло бяло, нормално бяло и студено бяло, чиито относителни цветови координати са показани на фигурите по-горе (фиг. 6, 7 и 8), включващи и зоните на отклонение на Мак Адам [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

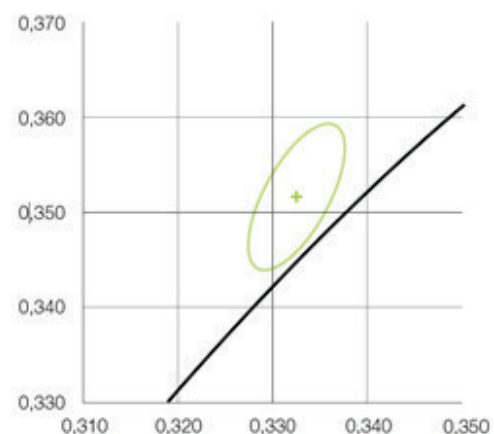
Изследователска лаборатория 7.5 „Интелигентни енергоспестяващи системи и технологии“ към Центъра за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии" е една от специализираните лаборатории предвидени за изграждане в центъра за компетентност. Проектът се финансира чрез Оперативна програма „Наука и образование за интелигентен растеж“ 2014-2020“.



Фиг. 6. Относителни цветови координати на LED с топло-бяла светлина (3000K)



Фиг. 7. Относителни цветови координати на LED с бяла светлина (4000K)



Фиг. 8. Относителни цветови координати на LED със студено-бяла светлина (5700K)



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.

В една по-далечна перспектива, натрупаният опит ще се споделя с потенциални клиенти, интересувани се от проектирането на пасивни сгради и обекти с минимизирано енергопотребление; от експлоатацията, профилактиката и поддръжката на покривни фотоволтаични централи.

Не на последно място, демонстрирайки възможностите за преобразуване на енергия на различни типични възобновяеми източници на енергия пред студенти, се цели приобщаването на студентите към изследователската дейност, провеждана в Центъра за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторите изказват благодарност към проект BG05M2OP001-1.002-0023, Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

REFERENCE

- [1] <https://www.emde-solar.com/fotovoltaichen-panel-emde-solar-slanchev-solaren-panel-5w-12v-monokristalen-silicii-2969>
- [2] <https://solarhouse.bg/product/monokristalen-fotovoltaichen-panel-5w/>
- [3] <https://www.tme.eu/bg/details/cl-sm5p/fotovoltaichni-moduli/cellevia-power/>
- [4] <https://www.kraft-shop.com/соларен-панел-5>
- [5] Ledxon, Alustar G20-30.pdf



КОНФИГУРИРАНЕ НА РОБОТИЗИРАНА СИСТЕМА С КОЛАБОРАТИВНИ ФУНКЦИИ И ТЕХНИЧЕСКО ЗРЕНИЕ

ROBOTIZED SYSTEM CONFIGURATION WITH COLLABORATIVE FUNCTIONS AND MACHINE VISION

**Tihomir Stoyanov, Katia Madzharova, Pavel Radev, Vasil Popov, Nikola Shakev,
Sevil Ahmed, Andon Topalov**

Technical University of Sofia, Branch Plovdiv, Control Systems Department

Abstract

The emergence of new technologies poses new tasks and challenges to robotics and leads to its development. In recent years, the main element of development has been the rich information possibilities, which are provided by the introduction of technologies and technical solutions related Industry 4.0. Much attention is paid to the integration of computer vision systems in the control of robotic systems, as a basic approach enriching information about the surrounding environment and the workspace. Thus, the paper presents a robotized system configuration with collaborative functions and machine vision.

Keywords: Robotized System, Collaborative Robots, Machine Vision.

ВЪВЕДЕНИЕ

Появата на нови технологии поставя нови задачи и предизвикателства пред роботиката и води до нейното развитие. През последните години основен елемент на развитието са богатите информационни възможности, които се осигуряват от въвеждането на технологиите и техническите средства, навлизащи с т.н. Четвърта индустриална революция. Голямо внимание се отделя на редица задачи като: създаване и използване на интегрирани информационни и производствени системи [1,2], системи за информационна сигурност [3], интуитивни човеко-машинни интерфейси и др. Интегрирането на системи за компютърно зрение в управлението на робототехническите системи се явява основен подход обогатяващ информацията за заобикалящата среда. Наличието на визуална обратна връзка разширява възможностите на алгоритмите за управление в динамична и неструктурирана среда. Друг важен

аспект е безопасността. Съвместната работа робот-човек и/или робот-робот, споделянето на едно общо работно пространство вече е възможна и безопасна благодарение на колаборативните роботи и защитните сензорни елементи и бариери.

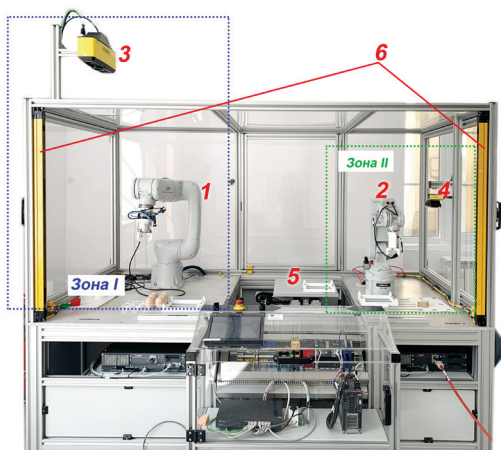
В този аспект, докладът представя основните компоненти и особености при конфигуриране на роботизирана система с колаборативни функции и техническо зрение. Представени са и софтуерните платформи, които осигуряват тяхното програмиране.

ХАРДУЕРНАТА КОНФИГУРАЦИЯ

Представената система е научно-изследователска лабораторна конфигурация (Фиг. 1) от два шест-осни манипулатора Mitsubishi (1 и 2), две смарт-камери Cognex (3 и 4), светлинна защитна бариера (6) и серво-маса (5), които осигуряват изследването на задачи с различна сложност и насоченост.

Всеки модул представлява самостоятелно функциониращ елемент, който в конкретната конфигурация е част от роботизирана система с обособени две работни зони:

- 1) *Зона I. Създаване на колаборативни функции и получаване и обработка на 3D визуална информация.* Зоната дава възможност за съчетаване на работата на колаборативен манипулатор RV-5AS-D и Cognex 3D-A5060 3D камера;
- 2) *Зона II. Зона за получаване и обработка на 2D визуална информация и индустриален манипулатор RV-2FR.*



Фиг. 1. Научно-изследователска лабораторна конфигурация с колаборативни функции и техническо зрение

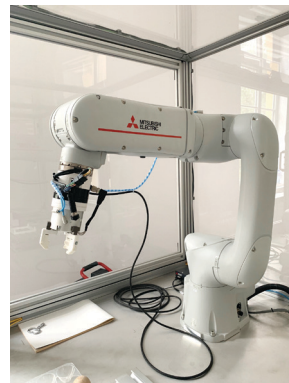
1. Колаборативен робот - Mitsubishi Electric RV-5AS-D

Колаборативният робот в конфигурацията е представен от вертикален шестосен робот RV-5AS-D (Фиг. 2). Той дава възможност за съвместна работа с хора, осигурявайки висока степен на безопасност.

Mitsubishi Electric RV-5AS-D има следните технически данни:

- *Максимална товароносимост: 5 кг*
- *Максимален обseg: 910 mm*
- *Степени на свобода: 6*
- *Инсталационна поза: възможност за монтаж на под, таван или стена*

- *Поддръжка на I тип контролер: D тип самостоятелен контролер (CR800-05VD контролер).*



Фиг. 2. Колаборативен робот - Mitsubishi Electric RV-5AS-D

2. Робот - Mitsubishi RV-2FR

Роботът Mitsubishi RV-2FR е част от серията RV-FR. Представлява робот с шест оси (Фиг. 3).



Фиг. 3. Робот - Mitsubishi RV-2FR

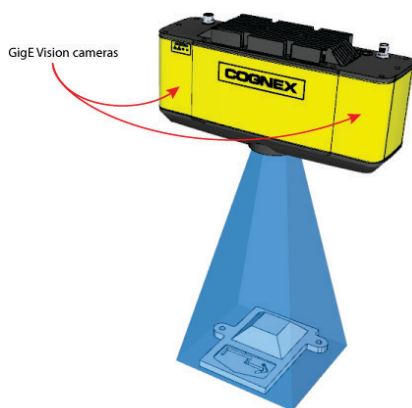
Двойната раменна структура предоставя предимства по отношение на стабилността, гъвкавостта и свободата на движение на робота.

Основните параметри на манипулатора са както следва:

- *Максимална товароносимост: 3 кг;*
- *Максимален обseg: 504 mm;*
- *Степени на свобода: 6;*
- *Инсталационна поза: възможност за монтаж на под, таван или стена.*

3. 3D камера - Cognex 3D-A5060

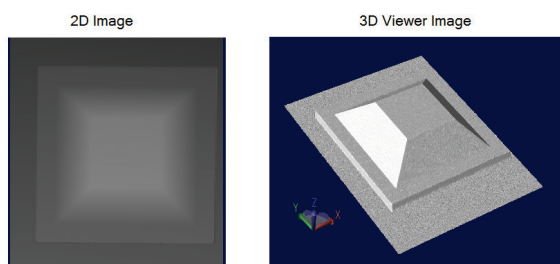
Сензорите Cognex 3D-A5060 (Фиг. 4.) съчетават проекция на структурирана светлина и две 2D камери за генериране на информация за 3D обекти. Сензорът проектира шаблон от структурирана светлина върху област в рамките на зрителното поле на двете камери. Софтуерът на Cognex изгражда 3D структура от данни, представляваща обекта от геометрично изкривени изображения, взети от двете камери, които след това могат да се разглеждат като статично 2D изображение или динамично 3D изображение (Фиг. 5.).



Фиг. 4. 3D камера - Cognex 3D-A5060.

След като 3D данните са налични, могат да се приложат различни инструменти за изпълнение на задачи като:

- Намиране на 3D позата на обучен 3D модел;
- Генериране на изчисления на височина или обем;
- Анализ на напречно сечение на обекта.



Фиг. 5. 2D (ляво) и 3D (дясно) изображение.

4. 2D камера - In-Sight 7600

Видео системата In-Sight 7600 е част от серията In-Sight 7000 от второ поколение. Серията In-Sight 7000 на фирма Cognex представлява многофункционална визуална система, с която могат да бъдат извършени бързи и точни инспекции на широк обхват от детайли и обекти във всички видове индустрии. Благодарение на своя компактен и модулен дизайн камерите от тази серия са лесно приспособими към разнообразни приложения. Камерите от тази серия разполагат с възможност за вътрешно и външно захранване и управление на осветлението. Освен това те са снабдени със светодиоден индикатор с помощта, на който може да се следи състоянието на инспекцията независимо къде е инсталирана системата. В тази серия са налични модели с монохромни и цветни сензори, с резолюции вариращи от VGA до 5 MP.



Фиг. 6. 2D камера - In-Sight 7600

5. Серво-маса

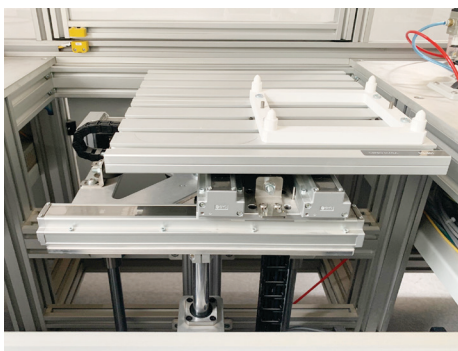
Между двата манипулатора в конфигурацията е разположена серво-маса (Фиг. 7), която дава възможност за създаване изследване на сложни алгоритми за взаимодействие и моделиране на производствени процеси и манипулации.

Основните характеристики на серво-масата са обобщени в Табл. 1.



Табл. 1. Параметри на използваната серво-маса

Функция/ характеристика	Техническа спецификация
Ход по ос X	300 mm
Ход по ос Y	300 mm
Ход по ос Z	150 mm
Товароносимост	6 kg
Точност на позициониране	±0.02 mm (за всички оси)
Система за управление	Модулна платформа iQ-R [4] Възможност за добавяне на различни процесори, входно-изходни модули, изчислителни модули, комуникационни модули.
Програмируем контролер (PLC)	Модел: R04CPU (производител: Mitsubishi Electric)
“С” контролер	Модел: R12CCPU-V Език за програмиране: C/C++ Комуникация: Ethernet, RS-232, SD card
Допълнителни функции	Комуникация с колаборативен робот Възможност за управление на серво маса от колаборативен робот Специализирани функционални блокове за изпращане на данни към облачни сървъри с цел анализ на данни, изчисления, изкуствен интелект, машинно обучение



Фиг. 7. Серво-маса

6. Управление на безопасността

За осигуряване на безопасна работа в системата са вложени следните специали-

зирани устройства: предпазна светлинна бариера, крайни изключватели на вратите на работната клетка и контролер обработващ сигналите от тези сензори – safety controller.

Светлинната бариера е от два компонента: излъчвател, приемник. Произведени са от фирмата Pilsz, моделите на излъчвателя и приемник са PSEN opl3H – s – 30 – 105 receiver/emitter.



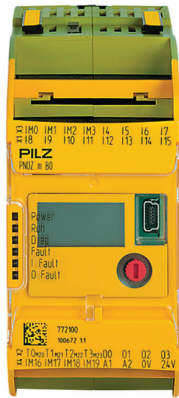
Фиг. 8. Светлинни сензори за безопасност – приемник и излъчвател.

Табл. 2. Параметри на светлинната бариера.

Излъчван сигнал от излъчвателя	Инфрочервен
Височина на зоната на безопасност	1050 mm
Резолюция (приблизителна големина на обект)	Ръка
Захранващо напр.	24 VDC
Дължина на вълната	850 nm
Време за реакция	9.1 ms

Магнитни сензори PSEN ma1.4a – 50 се използват за следене положението на вратите около манипулаторите. Сензорите връщат сигнал, когато вратите на работната клетка са затворени.

Контролерът (Фиг. 9), който обработва сигналите за нивото на безопасност около манипулаторите, приемащ входни сигнали от светлинната бариера и магнитните сензори е PILZ PNOZ m B0.



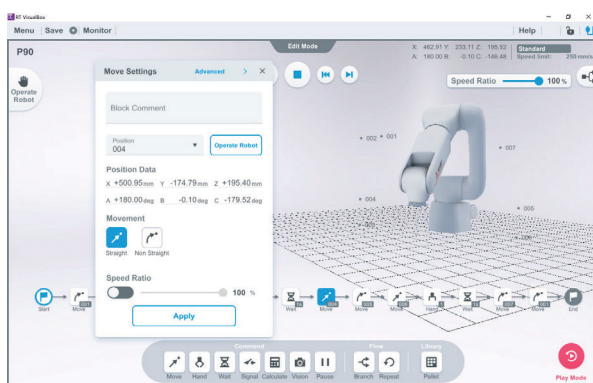
Фиг. 9. Контролер за безопасност

СОФТУЕРНА КОНФИГУРАЦИЯ

Описаната по-горе хардуерна конфигурация се програмира чрез специализирани софтуерни платформи. Комуникацията и взаимодействието на всеки елемент от роботизираната система се осъществява през контролен модул с възможност за използване на човеко-машинен интерфейс на Mitsubishi.

1. Софтуер за програмиране на колаборативния робот - RT VisualBox

MELSOFT RT VisualBox предоставя интуитивен интерфейс за програмиране на промишлени роботи, който използва графично представяне на програмата във вид на блокове. Това позволява на операторите да програмират робота без да имат предишен опит в програмирането на роботи.

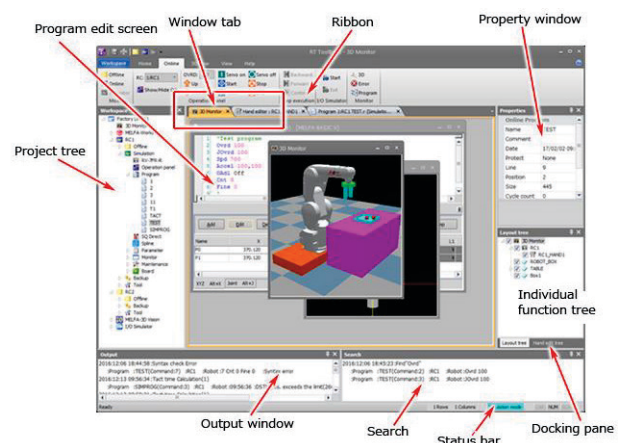


Фиг. 10. Изглед на софтуера за програмиране.

Освен това, софтуерът предлага и вградени средства за симулация и визуализация на движенията на робота, което позволява на потребителите да тестват нови програми преди да ги изпратят към реалния робот, без риска от повреда на оборудването.

2. Софтуер за програмиране на индустриалния манипулатор - RT ToolBox3

Софтуерният продукт RT ToolBox3 поддържа всички основни процеси свързани с работата на робота. Това включва програмиране, симулация, наблюдение на работата на робота след стартиране и отстраняване на неизправности. Програмната среда предоставя възможност за следене на променливи, входно/изходни сигнали и други събития свързани с изпълнението на програмата. Благодарение на симулациите създадените програми могат да бъдат изпълнени в компютъра, а движенията могат да бъдат проверени. Това позволява извършването на ефективни предварителни изследвания на системата. В зависимост от модела на робота програмите могат да бъдат редактирани с помощта на езиците MELFA-BASIC IV, V и VI.



Фиг. 11. Изглед на софтуера за програмиране RT ToolBox3



3. Софтуер за 3D техническо зрение - *Cognex VisionPro*

VisionPro е един от водещите PC-базиран софтуери за обработка на изображения. Той е проектиран да настройва и внедрява приложения за визуализация - независимо от камерата. С VisionPro потребителите могат да изпълняват широка гама от функции, от местоположение и проверка на геометрични обекти до идентификация, измерване, както и специализирани функции, специфични за полупроводникови и електронни приложения.

4. Софтуер за 2D техническо зрение - *In-Sight Explorer*

In-Sight Explorer представлява софтуер, който се използва за настройка и конфигуриране на визуални системи, използващи In-Sight камери на фирма Cognex. В него са включени интерфейсът EasyBuilder, както и развойната средата SpreadSheet.

In-Sight Explorer EasyBuilder посредством своя интуитивен интерфейс дава възможност за лесна настройка на приложенията стъпка по стъпка. Така потребителите независимо от своя опит могат да конфигурират дадена система. Когато е необходимо да се изпълни по-сложно и гъвкаво приложение за инспекция се използва In-Sight SpreadSheet, където по ефективен и надежден начин могат да се конфигурират инструментите за визуална обработка. В тази развойна среда са включени множество специализирани функции и операции, които подпомагат изпълнението на приложенията, без да е необходимо писането на програма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложеното решение за изграждане на система за промишлена автоматизация е реализирано като лабораторна установка в ТУ-София, филиал Пловдив. Представената система интегрира множество технически средства и управляващи програмни ре-

сурси. Изградена е интегрирана комуникационна структура, която позволява ефективен обмен на информация, използвайки две основни концепции: i) Ethernet мрежови обмен; ii) Интегрираната платформа „e-F@ctory“, която предлага подобрена производителност на комуникационната шина между процесорите на отделните устройства [4]. Структурата на системата позволява висока гъвкавост, изразяваща се във възможности за нейното разширяване и надграждане.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работата е подкрепена от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Наука и образование за интелигентен растеж 2014 - 2020“, проект ЦК „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“, № BG05M2OP001-1.002-0023.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] K. Saito and Y. Mita, “FA Integrated Solution: e-F@ctory and the Integrated Platform”, Mitsubishi Electric ADVANCE, vol 119, pp 2-4, 2007.
- [2] Akira Tsubone and Masahira Ikeda, MELSEC iQ-R Engineering Environment and Integrated Monitoring System for Process Control”, Mitsubishi Electric ADVANCE, vol 162, pp 5-8, 2018
- [3] R. Hrishev, “ERP systems and data security”, In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 878, no. 1, pp. 012009, IOP Publishing, 2020
- [4] Л. Живков, В. Попов, Р. Хрисчев, Н. Шакев, Приложно решение за разпределено управление на производствен процес с използване на етернет мрежа, Journal of Informatics and Inovative Technologies, стр. 29-32, брой 1, 2020 г., ISSN 2683-0930.

Мобилна, роботизирана платформа

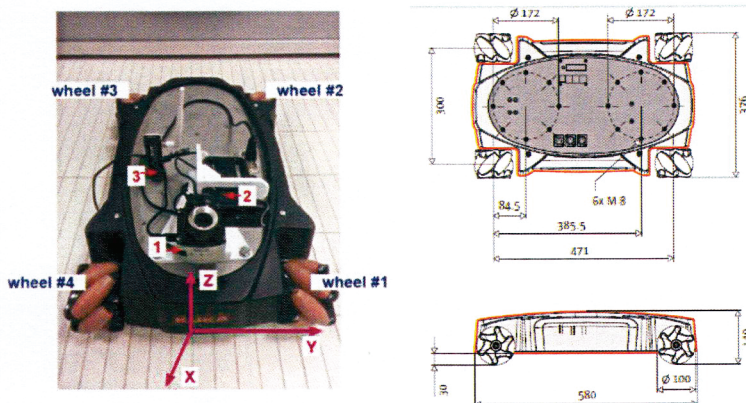
Тихомир Стоянов, Васил Попов, Севил Ахмед, Андон Топалов,

Катя Маджарова, Никола Шакев

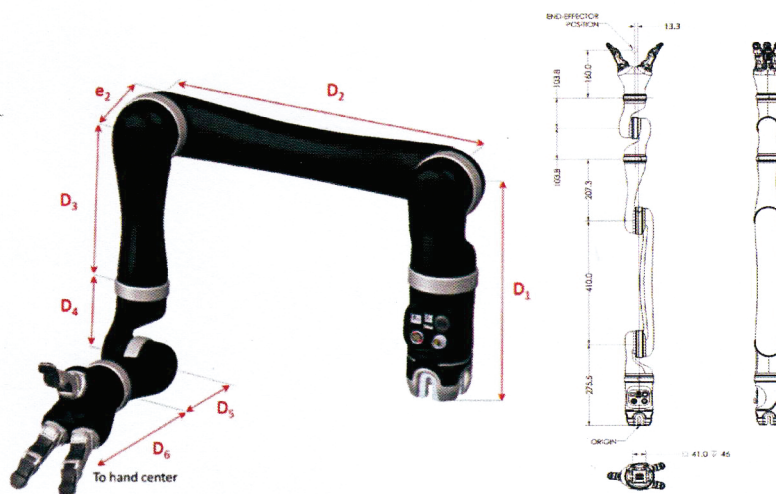
Лаб. С5.1. Умни (интелигентни) и специализирани роботи, ТУ-София Филиал Пловдив

ОСНОВА НА ПОДХОДА

Предложена е оригинална конструкция посредством компонентите: холономна мобилна платформа KUKA youBot, манипулатор с 6 степени на свобода със сферична китка, произведен от Канадската компания Kinova, лазерен далекомер Sick Tim 551, Cognex 7402C. Мобилната платформа е оборудвана с WiFi адаптер, който позволява установяването на ROS комуникационна структура. На Фигура 1 са показани основни размери на холономната мобилна платформа, в добавка Фигура 2 показва и роботизираната ръка с нейните размери.



Фигура 1 Геометрични на размери на мобилна платформа Kuka youBot.



Фигура 2 Геометрични размери на роботизирана ръка Kinova Jaco Gen 2.



Размерите на манипулатора са показани и таблично в Таблица 1, които стойности участват в математическите изрази, намиращи решение на правата кинематика.

Параметър	Описание	Дължина (m)
D1	От база до втора степен на свобода	0.2755
D2	Дължина на звено от втора степен на свобода към трета степен на свобода	0.41
D3	Разстояние между трета и четвърта степен на свобода	0.2073
D4	Разстояние между четвърта и пета степен на свобода	0.1038
D5	Разстояние между пета и шеста става	0.1038
D6	Разстояние от шеста става до работен орган	0.16
E2	Отместване между трета и четвърта става	0.0098

Таблица 1 Геометрични размери на звената на роботизираната ръка.

Мобилната платформа KUKA youBot е оборудвана с шведски (меканум) колела, позволяващи да се движи във всяка една посока в равнината и да прилага комплекси маневри. Управляващия хардуер се състои от ITX PC платка с процесор Intel Atom dual-core CPU, 2GB RAM, 32GB SSD, WLAN и USB интерфейс. Захранването на мобилната платформа е посредством акумулаторна батерия с напрежение от 24VDC или чрез захранващ адаптер. Операционната система е Linux Ubuntu. Мобилния платформа има монтажни отвори за прикрепянето на манипулатор, които отвори се използват за монтирането на Kinova Jaco. Разработката на изследователски софтуер за мобилната платформа и за манипулатора е посредством Robot Operating System (ROS).

Конвенционалният подход за описание на движение в равнина изисква дефинирането на координатни системи, локална (G, X, Y) и инерциална (O, X_i, Y_i) . Векторът колона,

$$p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

представя позицията на локалната координатна система спрямо глобалната неподвижна, изразяваща отместването по x , y и ориентацията θ . Мобилната платформа KUKA youBot се управлява с промяна на ъгловите скорости на колелата й.

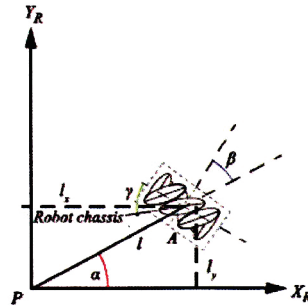
Кинематичният модел описва връзката между ротационната скорост на колелата $\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2, \dot{\varphi}_3, \dot{\varphi}_4$ и скоростта на движение на платформата в равнината. Видът на колелата определя набор от ограничения, според [1] отчитайки ограниченията наложени от конструкцията на колелата може да се определи кинематичния модел на мобилната платформа. За шведски колела следните математически изрази трябва да бъдат удовлетворени:

$$\begin{aligned} V_1 R(\theta) \dot{P} - r \dot{\varphi}_i \cos(\gamma_i) &= 0 \\ V_1 &= [\sin(\alpha_i + \beta_i + \gamma_i) \quad -\cos(\alpha_i + \beta_i + \gamma_i) \quad -l \cos(\beta_i + \gamma_i)] \\ VEC_2 R(\theta) \dot{P} - r \dot{\varphi}_i \cos(\gamma_i) - r_{sw} \dot{\varphi}_{sw} &= 0 \\ VEC_2 &= [\cos(\alpha_i + \beta_i + \gamma_i) \quad \sin(\alpha_i + \beta_i + \gamma_i) \quad -l \sin(\beta_i + \gamma_i)] \end{aligned} \quad (2)$$



Размерите на платформата са показани на Фигура 1, ъглите $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ се изчисляват [2] за всяко колело според израза:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \arctg\left(\frac{l_y}{l_x}\right) \approx 32.5^\circ & \alpha_2 &= 180^\circ - \arctg\left(\frac{l_y}{l_x}\right) \approx 147.5^\circ \\ \alpha_3 &= 180^\circ + \arctg\left(\frac{l_y}{l_x}\right) \approx 212.5^\circ = -147.5^\circ & \alpha_4 &= \arctg\left(\frac{-l_y}{l_x}\right) \approx -32.5^\circ \end{aligned} \quad (3)$$



Фигура 3 Параметри на позицията на колелата на мобилната платформа.

За да се изрази ъгъла β_i и разстоянието l използваме изразите:

$$\beta_i = 90 - \alpha_i; \quad l = \sqrt{l_x^2 + l_y^2} \approx 27.9 \text{ cm} \quad (4)$$

Изчислените параметри са дадени [2] в Таблица 2.

	α°	β°	γ°	l, m	r, m
Колело #1	32.5	57.5	-45	0.279	0.05
Колело #2	147.5	-57.5	45	0.279	0.05
Колело #3	-147.5	-122.5	-45	0.279	0.05
Колело #4	-32.5	122.5	45	0.279	0.05

Таблица 2 Кинематични параметри на мобилната платформа

Правият кинематичен модел на мобилната платформа е:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \frac{r}{4} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \\ \dot{\phi}_4 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Обратният кинематичен модел има следния вид:

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \\ \dot{\phi}_4 \end{pmatrix} = \frac{1}{r} \begin{pmatrix} 1 & -1 & -(l_x + l_y) \\ 1 & 1 & -(l_x + l_y) \\ 1 & -1 & (l_x + l_y) \\ 1 & 1 & (l_x + l_y) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} \quad (6)$$

В Таблица 3 са дадени физически характеристики на манипулатора Kinova Jaco Gen2.

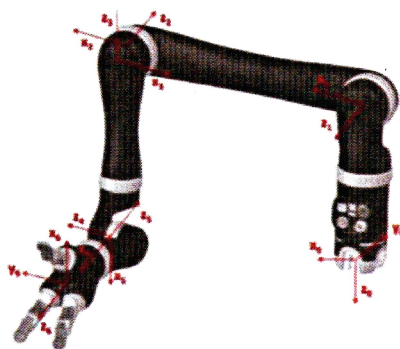
Софтуерните пакети осигурени от KINOVA набавят достъп до функционалности на манипулатора. Development Center и Torque Console дават възможност за мониторинг на състоянието на робота,



промяна на координатни системи, дефиниране на траектории, експериментиране с управляващи алгоритми и д.р. Kinova Jaco Gen 2 може да работи и като интегрирано устройство в средата на ROS. Наборът от пакети за управление kinova-stack позволява генериране на ROS възли за тестване функционалностите на устройството с готови софтуерни решения, също и надграждането на вече съществуващите приложения. На Фигура 4 са показани приетите координатни системи, прикрепени към съответните звена на манипулатора.

Маса	4.4kg
Обхват	98.4cm
Товароносимост	2.6kg (mid-range)/2.2kg (full-range)
Материали	Carbon fiber/Aluminium
Максимална линейна скорост	20cm/sec
Захранващо напрежение	18 – 29 VDC
Средна мощност	25W (15W standby)
Максимална мощност	100W
Комуникационен протокол	RS485
Комуникационни кабели	20 pins flat flex cable
Клас водоустойчивост	IPX2
Операционна температура	-10 to 40 °C

Таблица 3 Технически параметри на манипулатор Kinova Jaco Gen 2.



Фигура 4 Разположение на координатните системи при роботизираната ръка.

Таблица 4 е с параметризираните връзки между ставите на робота според конвенцията на Денавит-Хартенберг [3].

i	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	$\pi/2$	0	$D1$	$q1$
2	π	$D2$	0	$q2$
3	$\pi/2$	0	$-e2$	$q3$
4	$\pi/2$	0	$-(D3 + D4)$	$q4$
5	$\pi/2$	0	0	$q5$
6	π	0	$-(D5 + D6)$	$q6$

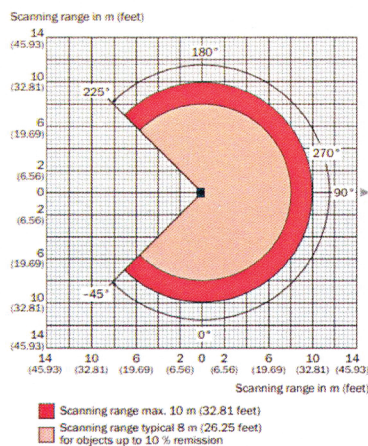
Таблица 4 Таблица с параметри на Денавит и Хартенберг [4].



На Фигура 5 е показан лазерния далекомер Sick Tim 551, използван за определяне на разстоянията от мобилната платформа с монтиран манипулатор до обкръжаващи те ги обекти в работната среда.



Фигура 5 Sick Tim 551



Фигура 6 Зона на обхват (градуси) на Sick Tim 551.

Основни технически характеристики на устройството са показани в Таблица 5.

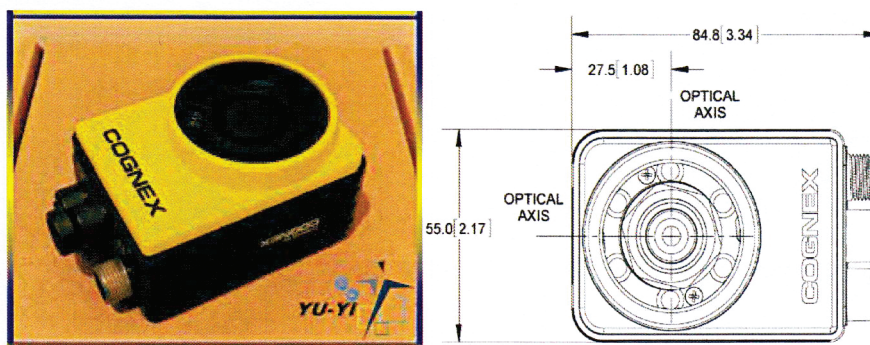
Честота на сканиране	15Hz
Ъглова резолюция	1°
Работен обхват	0.05m – 10m
Сканиращ обхват	8m

Таблица 5 Технически данни на сензора Sick Tim 551.

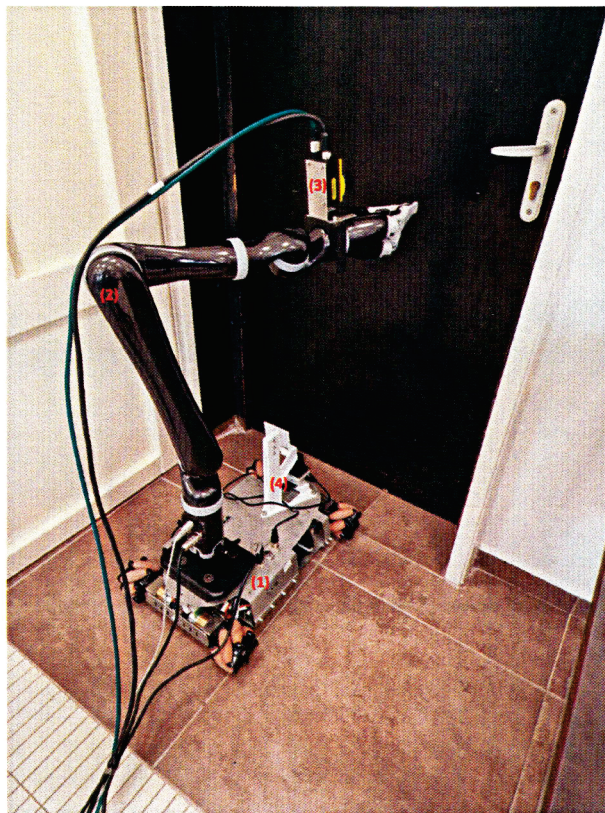
Връзката за трансфер на данни от сензора към разработените алгоритми е посредством Micro USB, типе B, захранването е 24VDC и е достъпно от захранваща буksа на мобилната платформа.

Зоната на обхват на далекомера е показана на Фигура 6.

На фигура 7 е показана камерата COGNEX In-Sight 7402C – смарт камера от ново поколение, самостоятелна система за машинно зрение, използвана за автоматизирана инспекция, идентификация на обекти, измервания, управление на работи и др. в производствени предприятия. Има готовност за работа в мрежа, да се конфигурира от разстояние по мрежата използвайки специализиран софтуер.



Фигура 7 камера COGNEX In-Sight 7402C и физическите ѝ размери.



Фигура 8 Комплекс от мобилна платформа Kuka youBot (1), манипулатор Kinova Jaco 2 (2), индустриална система за машинно зрение Cognex 7402C (3), лазерен далекомер Sick Tim 551 (4)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С така асемблираната система се дава предпоставка за по-нататъшни изследвания свързани с:

- управление на мобилния манипулатор чрез лазерен далекомер;
- управление на мобилния манипулатор чрез камера монтирана на мобилната платформа;
- управление на мобилния манипулатор чрез камера монтирана на индустриалния манипулатор;
- управление на мобилния манипулатор чрез комбинация от горните;

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Siegwart, I. Nourbakhsh, Introduction to Autonomous Mobile Robots, MIT Press (2004)
2. Ahmed S.A., Topalov A.V., Shakev N.G., Popov V.L., Model-Free Detection and Following of Moving Objects by an Omnidirectional Mobile Robot using 2D Range Data, (2018) IFAC-PapersOnLine, 51 (22), pp. 226 – 231, DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.11.546
3. Paul, Richard (1981). Robot manipulators: mathematics, programming, and control : the computer control of robot manipulators. Cambridge, MA: MIT Press. ISBN 978-0-262-16082-7.
4. Kinova Gen2 Ultra lightweight robot. User Guide, 2019.

----- www.eufunds.bg -----

Проект BG05M2OP001-1.002-0023, 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.