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“

19 юни 2026

Пловдив

ЕВРОПЕЙСКИ СЪЮЗ
ЕВРОПЕЙСКИ СТРУКТУРНИ И ИНВЕСТИЦИОННИ ФОНДОВЕ

Изпълнителна агенция „Програма за образование“

ОПЕРАТИВНА ПРОГРАМА
НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ ЗА ИНТЕЛИГЕНТЕН РАСТЕЖ

INTERNATIONAL

SCIENTIFIC CONFERENCE

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

PROCEEDINGS

JUNE 2026
PLOVDIV

The conference is held on:

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

www.eufunds.bg

© UNIVERSITY PUBLISHING HOUSE "V. APRILOV" – GABROVO, 2026
TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO
ISSN: 2815-4924

ЕВРОПЕЙСКИ СЪЮЗ
ЕВРОПЕЙСКИ СТРУКТУРНИ И ИНВЕСТИЦИОННИ ФОНДОВЕ

Изпълнителна агенция
„Програма за образование“

ОПЕРАТИВНА ПРОГРАМА
НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ ЗА ИНТЕЛИГЕНТЕН РАСТЕЖ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ

„МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“

СБОРНИК ДОКЛАДИ

ЮНИ 2026
ПЛОВДИВ

Конференцията се провежда по:

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

www.eufunds.bg

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ

MEECT'26

С Б О Р Н И К Д О К Л А Д И

Университетско издателство “Васил Априлов” – Габрово

ISSN: 2815-4924

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ ПЛОВДИВ 26

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

Пловдив, 19 юни 2026 година

Организационен комитет:

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

Програмен комитет:

Председател: проф. д-р инж. Илия Железаров - ТУ-Габрово, България
Членове: акад. Чавдар Руменин - Институт по роботика, БАН, София, България
акад. Тони Спасов - СУ „Св. Кл. Охридски“ ФХФ, България
чл. кор. Красимир Данов - СУ „Св. Кл. Охридски“ ФХФ, България
проф. дн инж. Иван Кралов - ТУ-София, България
проф. д-р инж. Вълю Николов - ТУ-София, Филиал-Пловдив, България
проф. д-р инж. Михаил Петров - ТУ-София, Филиал-Пловдив, България
проф. д-р инж. Андон Топалов - ТУ-София, Филиал-Пловдив, България
проф. д-р инж. Гриша Спасов - ТУ-София, Филиал-Пловдив, България
проф. дфн Румен Каканаков - ЦЛПФ, БАН-Пловдив, България
проф. д-р Лиляна Колаклиева - ЦЛПФ, БАН-Пловдив, България
проф. дтн Таньо Танев - Институт по роботика, БАН, София, България
проф. д-р Кръстанка Маринова - СУ „Св. Кл. Охридски“ ФХФ, България
проф. д-р Август Иванов - Институт по роботика, БАН, София, България
проф. д-р Николай Ганев – Чешки технически университет, Прага, Чехия
проф. д-р Драган Антич - Университет Ниш, Сърбия
проф. д-р Йован Степанович - Университет Ниш, Сърбия
проф. д-р Душан Трайкович - Университет Ниш, Сърбия
проф. д-р Мирослав Зетек - Университет на Западна Бохемия, Пилзен, Чехия
доц. д-р Ивана Зеткова - Университет на Западна Бохемия, Пилзен, Чехия
доц. д-р Татяна Куцарова - Институт по електроника, БАН, София, България
доц. д-р Стефан Вълков - Институт по електроника, БАН, София, България
доц. д-р инж. Ивайло Неделчев - ТУ-Варна, България
доц. д-р Егнар Йоздикилилер – Технически университет – Истанбул, Р.Турция
проф. дтн инж. Райчо Иларионов - ТУ-Габрово, България
проф. дтн инж. Йордан Максимов - ТУ-Габрово, България
проф. дн. инж. Галя Дунчева - ТУ-Габрово, България
проф. д-р инж. Ирина Александрова - ТУ-Габрово, България
проф. д-р инж. Звездица Ненова - ТУ-Габрово, България
проф. дн инж. Димитър Дичев - ТУ-Габрово, България
проф. д-р инж. Николай Маджаров - ТУ-Габрово, България
проф. д-р инж. Тошко Ненов - ТУ-Габрово, България
проф. д-р инж. Ангел Анчев - ТУ-Габрово, България

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

C O N T E N T S

PROCESS OF ELECTRON BEAM WELDING 13
Stefan Valkov, Georgi Kotlarski, Nikolay Nedyalkov, Tatyana Koutzarova, Maria Ormanova, Borislav Stoyanov, Ivana Ilievska, Fatme Padikova
Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria
Technical University of Gabrovo, Bulgaria

ADVANCED APPROACHES AND TRENDS IN ELECTRON-BEAM PROCESSING OF METALS AND ALLOYS 22
Stefan Valkov, Georgi Kotlarski, Nikolay Nedyalkov, Tatyana Koutzarova, Maria Ormanova, Borislav Stoyanov, Ivana Ilievska, Fatme Padikova
Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria
Technical University of Gabrovo, Bulgaria

STUDY OF HIGH-SPEED STEEL P6M5K5 MACHINABILITY IN THE MANUFACTURE OF CONICAL COREDRILL 28
Hristo Radev
Technical University of Gabrovo, Bulgaria

FIXING CUTTING INSERTS ON HOLDERS DURING TURNING 33
Hristo Radev
Technical University of Gabrovo, Bulgaria

APPLICATION OF THE K-MEANS ALGORITHM FOR CLUSTERING AND ANALYSIS OF SPATIO-TEMPORAL TRANSPORT DATA 39
Teodora Mecheva
Technical University of Sofia, branch Plovdiv, Bulgaria

COMPARATIVE XRD ANALYSIS OF LEADED AND LEAD-FREE BRASSES: THE IMPACT OF THERMAL TREATMENT ON PHASE STABILITY 45
Vladimir Petrov Dunchev
Technical University of Gabrovo, Bulgaria

COMPARATIVE MICROSTRUCTURAL EVOLUTION AND SUSTAINABILITY ANALYSIS OF LEADED VS. LEAD-FREE BRASS ALLOYS 50
Vladimir Petrov Dunchev
Technical University of Gabrovo, Bulgaria

STORING VIDEO DATA WITH EXTENDED INFORMATION ABOUT METEOROLOGICAL PHENOMENA 55
Ivaylo Atanasov, Petya Pavlova, Dobrinka Petrova, Boryana Pachedjieva
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

APPLIED METHODOLOGY FOR COMPILING A MAP OF CORRESPONDENCES BETWEEN DIGITAL DATA AND METEOROLOGIC ATMOSPHERIC OBJECTS 61
Petya Pavlova, Dobrinka Petrova, Ivaylo Atanasov, Boryana Pachedjieva
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

EXTENSION DESIGN OF THE SYSTEM FAS 200 IN THE LABORATORY ON INTELLIGENT AUTOMATED MANUFACTURING SYSTEMS 67
Albena Taneva, Michail Petrov
Technical University of Sofia, branch Plovdiv, Bulgaria

DEVELOPMENT OF A CALIBRATION CHAMBER FOR MULTISENSOR ELECTRONIC NOSE SYSTEMS 73
Stefan Ivanov, Zvezditza Nenova, Kostadin Zikatanov, Stanimir Yordanov
Technical University of Gabrovo, Bulgaria

SURFACE PROPERTIES OF OIL-SOLUBLE POLYGLYCERYL OLEATES AT OIL/WATER INTERFACES 80
Rumyana Stanimirova, Krassimir Danov, Jordan Petkov
Sofia University "St. Kliment Ohridski", Bulgaria
Arxada, Hexagon Tower, Crumpsall Vale, Blackley, Greater Manchester, Manchester, UK
The University of Manchester, Schuster Building, Oxford Road, Manchester, UK

DEVELOPMENT OF AN AI-READY EXPERIMENTAL PLATFORM FOR SOLAR TRACKING AND PHOTOVOLTAIC MONITORING 88
Misho Matsankov, Atanas Radulov, Mario Dechev
Technical University of Sofia, branch Plovdiv, Bulgaria

ANALYSIS OF ELECTRICAL ENERGY GENERATION FROM A PHOTOVOLTAIC POWER PLANT FOR LABORATORY 7.6 "INTEGRATED ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES" 95
Stanimir Stefanov
Technical University of Sofia, branch Plovdiv, Bulgaria

INFLUENCE OF THERMAL RESISTANCE OF THE SOIL WHEN LAYING UNDERGROUND POWER CABLES 100
Hristo Hristov
Technical University of Gabrovo, Bulgaria

RESULTS OF MEASUREMENT OF THE THERMAL RESISTANCE OF THE SOIL WHEN LAYING UNDERGROUND POWER CABLES FOR A PHOTOVOLTAIC POWER PLANT 105
Hristo Hristov
Technical University of Gabrovo, Bulgaria

EFFECT OF POLYGLYCERYL ESTERS ON THE RHEOLOGY OF WORMLIKE MICELLAR SOLUTIONS 109
Gergana Georgieva, Rumyana Stanimirova, Krassimir Danov, Jordan Petkov
Sofia University "St. Kliment Ohridski", Bulgaria
Arxada, Hexagon Tower, Crumpsall Vale, Blackley, Greater Manchester, Manchester, UK
The University of Manchester, Schuster Building, Oxford Road, Manchester, UK

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация" 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

METHODS FOR CLAMPING UP AND SELECTION OF TOOLS FOR METAL-CUTTING MACHINES 116
Hristo Yakimov
Technical University of Gabrovo, Bulgaria

ANALYSIS OF WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEM WITH EXTENDED AIR GAP 121
Desislav Iliev, Nikolay Madzharov
Technical University of Gabrovo, Bulgaria

FLYBACK CONVERTER AS A COMPONENT OF ELECTRIC VEHICLE POWER ELECTRONICS 128
Ivan Maradzhiev, Tsvetana Grigorova
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

COMPARATIVE STUDY OF Al TARGET POWER CONTROL DURING DEPOSITION OF CRAIN THIN FILMS FOR SURFACE ENGINEERING 135
Vasiliy Chitanov, Ekaterina Zlatareva, Stefan Kolchev, Denis Faik, Marin Gioshev, Tetiana Cholakova, Chavdar Pashinski, Roumen Kakanakov, Lilyana Kolaklieva
Bulgarian Academy of Sciences, Plovdiv, Bulgaria
Technical University-Sofia, Plovdiv, Bulgaria
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

DED-ARC SYSTEM FOR ADDITIVE MANUFACTURING IN THE LABORATORY OF TU-SOFIA, PLOVDIV BRANCH 143
Svetlana Boshnakova, Mehmed Medev
Technical University of Sofia, branch Plovdiv, Bulgaria

ANALYSIS OF THE WORK OF ELECTRICITY CONSUMERS FROM THE FOOD AND FLAVOUR INDUSTRY 148
Lyubomir Dimitrov, Svilen Rachev
Technical University of Gabrovo, Bulgaria

STAND FOR RESEARCHING THE OPERATION OF AN INDUCTION MOTOR THROUGH DIFFERENT CONTROL METHODS 154
Lyubomir Dimitrov, Svilen Rachev
Technical University of Gabrovo, Bulgaria

EFFICIENCY SIMULATION OF A HYBRID THERMAL SYSTEM IN DIFFERENT CLIMATIC ZONES 159
Nadezhda Vasileva
Technical University of Sofia, branch Plovdiv, Bulgaria

MONITORING OF ELECTRICAL GRID PARAMETERS IN A UNIVERSITY BUILDING WITH A PHOTOVOLTAIC POWER PLANT 165
Ivaylo Stoyanov, Plamen Tsankov, Milko Yovchev, Hristo Ibrishimov, Ivaylo Lazarov, Mihail Kovachev
Technical University of Gabrovo, Bulgaria
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

FORMATION CONTROL OF AUTONOMOUS MOBILE ROBOTS: CONCEPTUAL MODELING AND SYSTEM ARCHITECTURE 171
Vanya Markova, Ventseslav Shopov, Maya Dimitrova, Aleksander Krastev
Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

A HARDWARE AND SOFTWARE FAULT MONITORING SYSTEM FOR AUTONOMOUS MOBILE ROBOTS 177
Vanya Markova, Ventseslav Shopov
Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

INFLUENCE OF WORKING GAS FLOW ON THE RELATION BETWEEN AL-TARGET POWER AND REACTIVE GAS FLOW IN DEPOSITION OF CRALSIN HARD COATING BY UNBALANCED MAGNETRON SPUTTERING IN CLOSED MAGNETIC FIELD 183
Ekaterina Zlatareva, Stefan Kolchev, Vasilliy Chitanov, Denis Faik, Marin Gyoshev, Tetiana Cholakova, Roumen Kakanakov, Lilyana Kolaklieva
Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

INFLUENCE OF HOMOGENIZATION SPEED ON THE MORPHOLOGY AND THERMAL BEHAVIOR OF POROUS CHITOSAN STRUCTURES 189
Tsveta Sarafska, Stanislava Ivanova, Hristo Petkov, Tony Spassov
Sofia University "St. Kliment Ohridski", Bulgaria

EXPERIMENTAL SETUP FOR STUDYING POSSIBLE APPLICATIONS OF INFRARED MATRIX SENSORS IN INTELLIGENT MONITORING SYSTEMS 194
Dimitar Yankov, Hristo Radev, Galidiya Petrova, Grisha Spasov, Georgi Bodurov
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

COMPARATIVE STUDY OF THE EFFICIENCY OF A SYSTEM FOR HEATING SUPPORT AND DOMESTIC HOT WATER PRODUCTION 200
Plamen Penchev
Technical University of Gabrovo, Bulgaria

EFFICIENCY OF TWISTED TAPES IN "TUBE-IN-TUBE" HEAT EXCHANGERS 206
Plamen Penchev
Technical University of Gabrovo, Bulgaria

ACCURACY VERIFICATION OF DIGITAL MULTIMETERS 212
Nedyu Nedev
Technical University of Gabrovo, Bulgaria

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация" 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

DEVELOPMENT OF HMI INTERFACE FOR CONTROL AND SETTING OF SERVOCONTROLLER SMC3A VIA ESP32 AND TFT DISPLAY 217
Todor Iliev Nedelchev, Prodan Ivanov Prodanov
Technical University of Gabrovo, Bulgaria

MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION AND PHASE TRANSFORMATIONS OF DISSIMILAR CARBIDIC AUSTEMPERED DICTILE IRON/ AISI 316L STAINLESS STEEL ELECTRON BEAM WELDS 226
Milka Atanasova
Technical University of Gabrovo, Bulgaria

ANALYSIS OF THE TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF A CNC MILLING AND TURNING CENTER "RAIS" T2500, TO ENSURE CONSISTENT CHARACTERISTICS OF THE MACHINED SURFACE WHEN TURNING PROFILED SURFACES 232
Kalin Anastasov
Technical University of Gabrovo, Bulgaria

BATTERY MANAGEMENT SYSTEM (BMS) 238
Raycho Ilarionov, Ivan Simeonov, Hristo Kilifarev, Egnar Özdikililer, Borislav Nedev
Technical University of Gabrovo, Bulgaria

RESEARCH IN THE LABORATORY "AUTOMOTIVE MECHATRONIC SYSTEMS" IN THE PERIOD 07.2025-06.2026 244
Krasimir Ambarev, Stiliyana Taneva, Valyo Nikolov,
Atanasi Tashev, Yordan Stoyanov
Technical University of Sofia, branch Plovdiv, Bulgaria

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR STRAIN GAUGE MONITORING OF DEFORMATIONS IN A LOAD-BEARING COMPONENT OF A HOIST MECHANISM 249
Angel Anchev, Tihomir Atanasov, Emilian Hristov
Technical University of Gabrovo, Bulgaria
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

THE ROLE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN ADDITIVE MANUFACTURING PROCESSES 255
Hristian Mitev
Technical University of Gabrovo, Bulgaria
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

INFLUENCE OF THE GEOMETRIC ORIENTATION OF THE PART ON THE INTERNAL STRESSES OCCURRING DURING SLM MANUFACTURING 260
Hristian Mitev
Technical University of Gabrovo, Bulgaria
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RA ROUGHNESS PARAMETER OF THE MACHINED SURFACE OF CUZN39PB3 BRASS, OBTAINED BY SURFACE PLASTIC DEFORMATION USING DIAMOND AND FERRO-TIC "C" DEFORMING ELEMENTS 265
Kalin Anastasov
Technical University of Gabrovo, Bulgaria
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

CLASSIFICATION AND COMPARATIVE ANALYSIS OF TEMPERATURE MEASUREMENT SENSORS 271
Iliyan Gospodinov, Dimitar Dichev, Iliya Zhelezarov, Tsanko Karadzhov
Technical University of Gabrovo, Bulgaria
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

ADDITIVE MANUFACTURING PROCESS FOR PRODUCING AN "INSERT" PART 279
Hristian Mitev, Kalin Anastasov
Technical University of Gabrovo, Bulgaria
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

ANALYSIS OF EXISTING STUDIES ON WING–PROPELLER LIFTING SYSTEMS FOR VTOL AIRCRAFT 287
Мартин Атанасов Зикямов, Христиан Петров Панайотов
Technical University of Sofia, branch Plovdiv, Bulgaria

SUPERCAPACITORS 295
Raycho Ilarionov, Ivan Simeonov, Hristo Kilifarev, Egnar Özdikililer, Borislav Nedev
Technical University of Gabrovo, Bulgaria
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

MATHEMATICAL MODELS FROM CROSS-SECTIONS OF PRIMARY TRAFFIC MANAGEMENT DATA BASED ON SPATIAL, TEMPORAL AND STRUCTURAL DIMENSIONS 301
Mariya Zhekova, Mitko Shopov
Technical University of Sofia, branch Plovdiv, Bulgaria
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

AUTOMATED PROCESS FOR MIGRATION FROM A RELATIONAL DATABASE MANAGEMENT SYSTEM TO NOSQL 307
Radoslav Furnadzhiev, Mitko Shopov, Nikolay Kakanakov
Technical University of Sofia, branch Plovdiv, Bulgaria
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация" 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

NETWORK TOPOLOGIES AND DEPLOYMENT OF IOT-BASED SOLUTIONS FOR SMART ROADS 313
Radoslav Furnadzhiev, Mitko Shopov, Maria Babanova
Technical University of Sofia, branch Plovdiv, Bulgaria
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

RELIABLE DATA COLLECTION FROM ROAD SENSORS 319
Radoslav Furnadzhiev, Mitko Shopov, Maria Babanova
Technical University of Sofia, branch Plovdiv, Bulgaria
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

HYBRID RESEARCH AND APPLICATION-ORIENTED LABORATORY FRAMEWORK FOR THE DEVELOPMENT, ANALYSIS, AND CONTROL OF SPECIALIZED ELECTRIC DRIVE SYSTEMS 326
Tihomir Stoyanov, Sevil Ahmed-Shieva, Nikola Shakev
Technical University of Sofia, branch Plovdiv, Bulgaria
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

ПРОЦЕС НА ЕЛЕКТРОННОЛЪЧЕВОТО ЗАВАРЯВАНЕ

PROCESS OF ELECTRON BEAM WELDING

Stefan Valkov[1,2,3], Georgi Kotlarski[1,3], Nikolay Nedyalkov[1,3], Tatyana Koutzarova[1,3], Maria Ormanova[1,2,3], Borislav Stoyanov[2,3], Ivana Ilievska[1,3] , Fatme Padikova[1,2,3]

[1]Institute of Electronics, Bulgarian Academy of Sciences, 1784 Sofia, Bulgaria
[2]Technical University of Gabrovo, 5300 Gabrovo, Bulgaria
[3]Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract
In the present work the process of electron beam welding was described in detail. The effect of some of the technological conditions in general on the structure and mechanical properties of the formed weld seams were described. In addition, the electron beam welding of similar and dissimilar metals and alloys was considered. Particularly of the similar kind aluminum alloy, Inconel alloy, and titanium alloy components were investigated. And in the case of dissimilar metals and alloys the Cu/304L, the Cu/Al, and the Ti/Al pairs of materials were studied. The obtained results were discussed in regards to obtaining optimal technological conditions for electron beam welding of any of the investigated pairs.

Keywords: electron beam welding; fillers, dissimilar welding.

ВЪВЕДЕНИЕ

Заваръчните процеси от са намерили приложения в най-различни индустриални отрасли за осъществяване на неразглобяеми съединения между метали и техните сплави. Това е породено от високата производителност на методите за заваряване. В практиката съществуват най-различни системи за заваряване, класифицирани по най-различни критерии, като цена на системата, цена на финалните изделия, вид на топлинния източник, топлинен отпечатък (входяща топлинна енергия), дълбочина на проникване (големина на течната вана), концентрацията на формиране на дефекти, възможността за автоматизация на процеса и най-различни други.

Един от най-потенциалните методи, покриващ набор от посочените критерии, е електроннолъчевото заваряване. То се осъществява в среда на висок вакуум, което значително понижава вероятността за абсорбцията на газове в течната вана, което от своя страна води до понижаване на дефектите (пори и пукнатини). Друго твърде важно предимство на електроннолъчевото заваряване е високата концентрация на топлинния източник, респективно дълбокото проникване на лъча и формирането на дълбок заваръчен шев. Това е съществено важно при челно заваряване на детайли с голяма дебелина. В зависимост от използваните системи и заваряваните метали могат лесно да се заварят детайли с дебелина над 20 mm. Това е трудно осъществимо с други методи, като например дъговобазираните такива, при които за осъществяване на подобен вид заваръчни съе-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

динения често се налага механичното формиране на „V“ и двойно „V“ образни канали по дължина на заваръчното съединение. Друго предимство на електорннолъчевото заваряване сравнено с други методи е силно локализираното генериране и разпространение на вътрешни напрежения, което намаля пластичната деформация на заваряваните компоненти. Заваряването на трудноотопими материали като W, Mo, Ta и други също лесно може да се осъществи поради високата плътност на топлинния източник.

Както всяка технология, електроннолъчевото заваряване не е перфектно. Поради високата концентрация на топлинния източник е необходимо предварителното механично присъединяване на заваряваните компоненти. В следствие на високата концентрация на източника на топлина е задължително избирането на оптимални технологични условия за заваряване. Дори минимални отклонения от тези условия водят не само до влошаване качеството и здравината на заваръчните съединения, но и до потенциалното им пълно унищожение. Обикновено, поради високата чистота на процеса и извършването на процеса във вакуумна среда, наличието на дефекти е нетипично и повече функция от характеристиките и химичния състав на заваръчните материали, отколкото от технологичните условия. При опит за заваряване на разнородни метали и сплави от съществено значение е скоростта на заваряване. Твърде високата скорост на заваряване може да доведе до частично проникване на източника в материалите (формиране на непълен заваръчен шев) и до недостатъчно смесване на материали и формирането на заваръчен шев със силно анизотропна структура, което може да доведе до формиране на крехки заваръчни съединения и до предварителното им разрушаване. Прекалено ниската скорост на заваряване подобрява смесването на материалите, но също така води до прекомерно разтапяне на материалите и протичането на заваръчния шев по посока успоредна на заваръчния източник.

Електроннолъчевото заваряване е изключително изследван и класически метод, но въпреки това поради високото си качество и приложимостта си, и възможността за автоматизация все още намира широко приложение в конструирането на широка гама компоненти за нуждите на различни индустрии. Поради все по-високите изисквания към заваръчните съединения изследванията, свързани със заваряване на разнородни метали е все по-актуална тема. Тъй като това е трудоемък процес (и не винаги възможен) често за неговото осъществяване се използват т.нар. филъри, които представляват материали (еднородни или композитни), позиционирани между двата основни компонента.

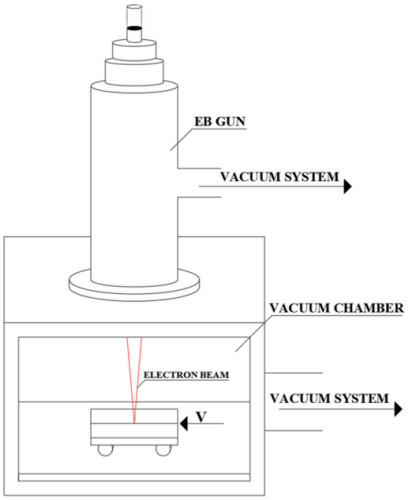
В това ревю накратко се обобщава физиката на процеса на електроннолъчево заваряване с и без наличието на филъри. Текущият прогрес в това направление е дискутиран, както и възможността за бъдещо подобрение на процеса на електроннолъчево заваряване с цел повишаване на механичната якост на шевовете и подобряване на приложимостта на метода.

ОСНОВИ НА ЕЛЕКТРОННОЛЪЧЕВОТО ЗАВАРЯВАНЕ

Електроннолъчевото заваряване се базира на използването на електронен сноп като топлинен източник. На фигура 1 е представена примерна схема на процеса на електроннолъчево заваряване. Електронният сноп се генерира в електроннолъчевия генератор, в който е поместен нагревателен елемент (обикновено волфрамов), който има висока температура на топене. Той служи за катод (отрицателно зареден електрод) в генератора. В следствие на процеса на нагряване се отделят електро-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

ни, които в началния си момент има малка собствена кинетична енергия. Последната се увеличава (т.е. енергията на електроните се повишава), като между електрода и анода се подаде високо напрежение (обикновено в рамките 50 – 100 kV).



***Фиг. 1**. Схема на електроннолъчево заваряване [1].*

Формирането на сноп от електрони се извършва чрез използването на индуктивни елементи, през които преминават електроните. Поради прилагането на електромагнитни сили върху тях те следват геометрията на полето. Промяната на тока на индуктивните елементи води до пряка промяна на плътността (фокусиране/разфокусиране) на потока от електрони. Съществено важно е целият процес да се извършва в среда на висок вакуум. Това е необходимо поради, не само значително по-лесното управление на потока от електрони, но и поради употребата на високо напрежение в системата. Високовакуумната среда в много случай служи като изолация между компонентите на електроннолъчевия генератор, без която може да настъпи повреда на машината.

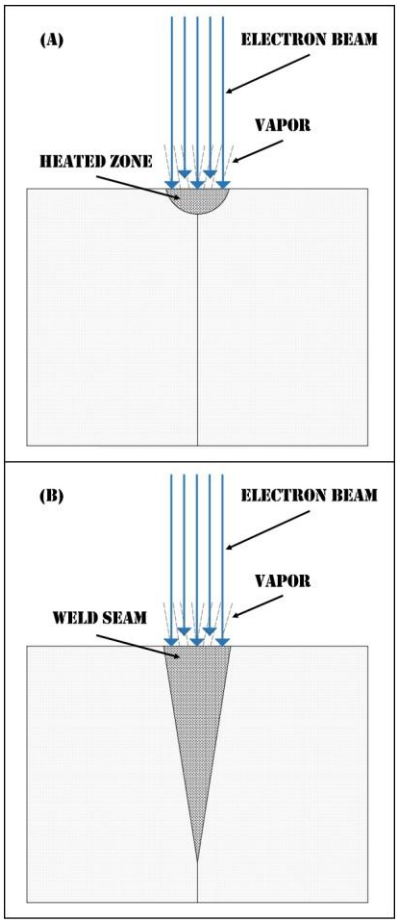
Вече формираният електронен сноп постъпва в работната камера. В нея се поместват основно обработваните детайли и подвижна CNC основа, към която се прикрепват те. Разстоянието между детайлите и електронния сноп се прецизира, след което неговият фокус се настройва, чрез гореспоменатите индуктивни елементи. Големината на фокусното петно на лъча се определя от процеса, който трябва да бъде извършен. При процеси като повърхността обработка или физическо отлагане от газова фаза фокусното петно на лъча трябва да е голямо, с ниска плътност на енергия. В случай на електроннолъчево заваряване обаче фокусното петно трябва да е максимално малко, респективно плътността на снопа трябва да е максимално голяма за постигане на максимално проникване.

Най-съществените технологични условия, които могат да бъдат варирани по време на работа с електроннолъчевата система са следните: ускоряващо напрежение „U_a [kV]“; ток на електронния сноп „I_b [mA]“; честота на сканиране „f [Hz]“; скорост на заваряване „v_w [mm/s]“. Разбира се това са само най-основните технологични условия, използвани по време на процеса на заваряване. Други технологични условия, които също могат да бъдат варирани включват налягането на вакуумната камера „P [Pa]“; предварително нагряване/охлаждане на заваряваните детайли „T [°C]“; използване на осцилация, респективно нейната форма, големина и честота; използването на филъри, респективно техния вид, размери, начин на нанасяне и много други.

На фигура 2 е показана примерна схема на формирането на течната вана по време на електроннолъчево заваряване. Първоначално потокът от електрони попада върху мишената, както е показано на фигура 2 (А). Проникването на електроните зависи от набор от фактори като ускоряващото напрежение, температурата на мишената, подредбата на кристалната структура, плътността ѝ и други. Във всички случай обаче при заваряване на дебелостенни

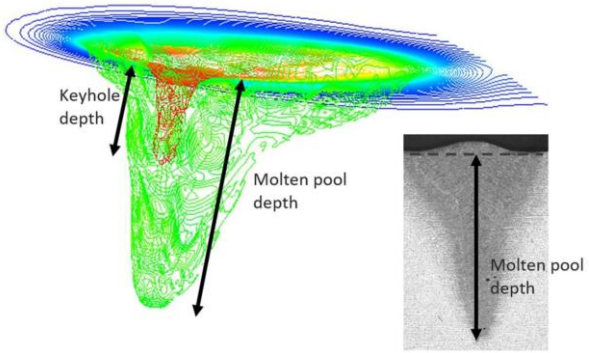
Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

обекти електроните не могат да преминат изцяло през целия им обем. Механизмът, който е отговорен за това е силното локално загряване на детайлите, при което се формира т.нар. парогазов канал, чрез който електроните проникват на достатъчна дълбочина за формиране на течна вана, която покрива целия обем на детайлите, както е показано на фигура 2 (B).



***Фиг. 2**. Формиране на течната вана в началния момент на контакт на материалната среда с електронния сноп (A) и след облъчване на мишената за време „t“ (B).*

В следствие насоченото движение на потока разтопен метал и потока пара се формира т.нар. „keyhole“ заваръчен шев, който има форма на отвор за ключ, както е показано на фигура 3. В зоната на контакт с електронния сноп температурата е най-висока и именно там настъпва процеса на топене на материал и формирането на течната вана. Стопеният материал, съгласно ефекта на Марангони, се придвижва от зони с по-ниско към зони с по-високо повърхностно напрежение, респективно от зоните с по-висока температура към зоните с по-ниска такава (практически зад електронния сноп). В тези зони материалът се охлажда и кристализира. Естествено от практична гледна точка е важно да се отбележи, че процесът на кристализация е тясно зависим от технологичните, най-вече от температурата и скоростта на заваряване.



***Фиг. 3.** Схема на електроннолъчево заваряване [2].*

ЕРЕКТРОННОЛЪЧЕВО ЗАВАРЯВАНЕ НА ЕДНОРОДНИ И РАЗНОРОДНИ МЕТАЛИ И СПЛАВИ

Както бе споменато по-горе заваряването чрез електронен лъч е силно използван процес, поради великолепните си предимства спрямо други по-конвенционални начини на заваряване (като дъговите например). Заваряването на титан и неговите сплави, например, е силно изследвано, тъй като този вид материали е добре познат с високата си активност, най-вече при високи температури, което означава, че е силно податлив към абсорбция на газове. Това може да доведе до формиране на порьозност, пукнатини и други дефекти, които да понижат якостта на заваръчното съединение. Тъй като електроннолъчевото заваря-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

ване се извършва в условие на висок вакуум практически се избягва опасността от абсорбция на газове. Saresh и съавтори [3] например успяват да заварят 17.5 mm дебелостенни детайли чрез електроннолъчева технология. Въпреки отличното проникване на лъча авторите установяват, че едностранното заваряване е недостатъчно за формиране на високоякостно съединение, дори при използване на високомощен източник от над 10 kW, и прилагат метод с двулицев шев, чрез който успяват да получат заваръчни съединения с близки якостни характеристики до основния метал. На по-късен етап Wang и съавтори [4] опитват да заварят титанова сплав чрез електронен сноп при различна геометрия на снопа. Установяват, че при заваряването на този тип титанова сплав не се откроява съществена разлика между механичните свойства на основния материал спрямо заваръчните съединения. Единствено при използване на линейна геометрия спрямо кръгловидна се наблюдава леко повишаване на механичните свойства. Успешното получаване на високоякостни и устойчиви заваръчни съединения чрез електроннолъчевия метод е доказано и от други автори [5, 6], които изследват именно този процес.

За разлика от титана и неговите сплави, алуминият не само е силно активен метал, но също така има най-високия коефициент на термично разширение. Това го налага като трудоемък метал за заваряване, тъй като тези му характеристики налагат неговата податливост към абсорбция на газове, както и формиране на пори и пукнатини при процеса на застиване на течната вана. Това е добре познат проблем при алуминия и неговите сплави, който частично може да бъде подобрен чрез прилагане на електроннолъчево заваряване. Cam и съавтори [7] опитват да заварят детайли от алуминиева сплав 7020, а Noga и съавтори [8] опитват да заварят детайли от алуминиева сплав 6082-T6. И в двата случая се наблюдава формирането на пори и пукнатини в структурата на заваръчните съединения. Това е причинено от високата скорост на втвърдяване на течната вана при процеса на електроннолъчево заваряване, респективно поради високата скорост на кристализация. Неминуемо това е сериозен проблем, който трябва да бъде разрешен, като едно от потенциалните решения е използването на подходящ филър в междината между двата детайла, с цел подобряване на смесването на материала и увеличаване на живота на течната вана.

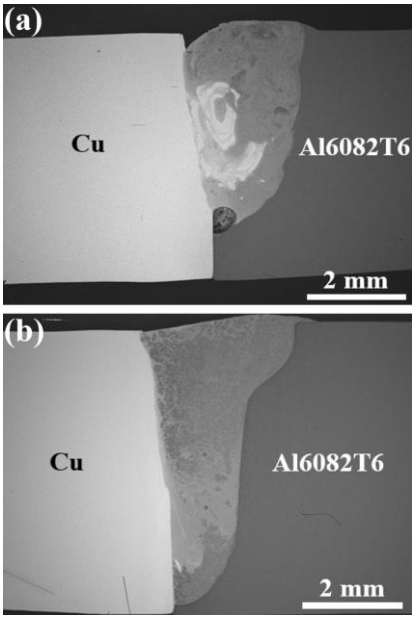
Други много потенциални и силно изследвани заваръчни материали са суперсплавите като например Inconel 706 и 718. При опит за заваряване чрез електронен сноп сплав от Inconel 706 Ferro и съавтори [9] успяват да получат заваръчни съединения с добри механични свойства, но сравнително по-ниски от тези на основната сплав поради формирането на пукнатини в заваръчния шев. Това е характерно за този вид сплави, тъй като при тях формирането на течната вана е трудоемък процес, при който адхезията между нея и основния (неразтопен или полуразтопен) метал е сравнително ниска. Въпреки това Reddy и съавтори [10] оптимизират технологичните условия на заваряване на сплав Inconel 718 и получават високоякостни съединения без наличие на дефекти. По-късно техният труд се потвърждава и надгражда от Patel и съавтори [11].

От практична гледна точка формирането само на еднородни заваръчни съединения е неизгодно. Комбинирането на два или повече материала е целесъобразно, не само от икономична гледна точка, но и поради възможността за комбиниране на свойствата на материалите и постигане на по-широка приложност и по-висока производителност. Именно поради това доста изследвана е възможността за присъединяване на разнородни метали и сплави с различни термофизични свойства. Една така-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

ва двойка, например, е мед със стомана. Обикновено стоманата, която се използва е 304L поради отличните си механични свойства и високата си устойчивост на корозия. Медта от своя страна е интересна поради високата си електрическа проводимост и отличните си термични свойства. Набор от предишни автори [12–14] са правили опити за електроннолъчево заваряване на този тип двойка материали, но поради твърде голямата разлика в термофизичните свойства се наблюдава формиране на пукнатини в заваръчните шевове на границата между двата материала, което води до значително понижаване на механичните свойства и дори до разрушаване на съединението.

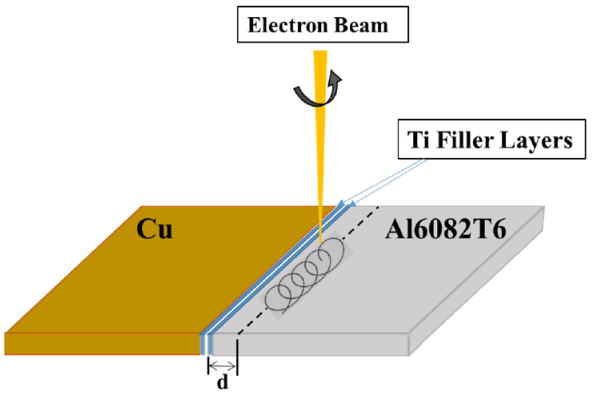
Друга много популярна двойка поради сходни съображения е мед/алуминий. Алуминият има висока якост, ниско тегло, ниска цена и сравнителна добра корозионноустойчивост. В същото време има също задоволителни температурни характеристики, значително по добри от тези на стоманите. Предишни експерименти бяха извършени, при които бе установен оптималния ток на електронния сноп за заваряване на тази двойка [15], а именно I_b = 45 mA. Важно е да се отбележи, че във всички експерименти, свързани със заваряване на алуминий и мед бяха използвани чиста мед 99.9 % и алуминиева сплав 6082-T6. Както бе отбелязано в частта за мед/стомана 304L проблем при заваряването им, който е присъщ и за двойката мед/алуминий е формирането на пукнатини в границите между заваръчното съединение и някой от основните метали. Друг съществено важен проблем е формирането на интерметални съединения между медта и алуминия от типа Cu_xAl_y. Теоретично тези съединения имат отлични механични характеристики, съответно тяхното наличие може да доведе до повишаване якостта на съединението. Проблемът обаче е, че при електроннолъчевото заваряване (особено с по-висока скорост) живота на течната вана, съответно времето за смесване между двата материала е много малко. Често част от компонентите на системата остават несмесени, а дори и да се формират интерметални съединения разпределението им в обема на заваръчния шев е недостатъчно хомогенно за постигане на изотропни свойства на шева. Именно това води до получаване на крехки съединения с нищожни механични свойства. За да се подобри смесването между материалите и да се удължи живота на течната вана може да се използва т.нар. осцилация на електронния сноп. В случая Kaisheva и съавтори [16] са използвали кръгова осцилация с радиус r = 0.1 и r = 0.2 mm. На фигура 4 (a) е представен заваръчния шев, получен чрез осцилация r = 0.1 mm, а на фигура 4 (b) е показан заваръчния шев, получен чрез осцилация r = 0.2 mm. Видно е, че във вторият случай заваръчният шев е не само по-дълбок, но и най-важното, по-хомогенен. Това повишава механичните свойства на цялата система мед-заваръчен шев-алуминиева сплав.



Фиг. 4. *СЕМ изображения на заваръчни съединения между мед и алуминий 6082-T6, изработени с осцилация r = 0.1 mm (a) и r = 0.2 mm (b)* [16].

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Въпреки получените резултати и подобряването на качеството на заваръчните шевове, получени чрез електронен сноп между мед и алуминий, механичната им якост остава значително под нивото на технологичните и индустриални изисквания. Именно поради този факт бе изследвана и възможността за подобряване на структурата и свойствата на съединения на тази двойка материали чрез нанасяне на филър в напречната междина, образувана при механичното им присъединяване [17]. Схема на процеса е показана на фигура 5. За материал на филъра е избран чист титан. Той е нанесен върху сечението на детайлите посредством постояннотоково магнетронно разпрашване. За целта на експеримента са избрани ток на електронния сноп от I_b = 45 mA, ускоряващо напрежение U_b = 60 kV, скорост на заваряване v_w = 15 mm/s, кръгова осцилация с радиус r = 0.2 mm и офсет на лъча към алуминиевия детайл равен на d = 0.5 mm. Както е известно съществуват двукомпонентни интерметални съединения между мед и титан, както и между титан и алуминий, а също така съществуват и трикомпонентни интерметали съединения на мед-титан-алуминий. Интересно е, че въпреки този факт, в заваръчното съединение бе регистрирано само наличие на $CuAl_2$ интерметални съединения. Титанът не е влязъл в съединение нито с медта, нито с алуминия, но в същото време е успял да модулира формирането на интерметалните съединения и най-вече тяхното хомогенно разпределение. В следствие на значителното подобряване на структурата на съединението бе отчетено 148 % увеличение на механичната якост на електроннолъчевото заваръчно съединения спрямо това без филър.



Фиг. 5. *Схема на електроннолъчево заваряване на мед с алуминий 6082-T6 и титанов филър* [17].

Силно приложна и интересна е и двойката между титан и алуминий. В частност следващите описани изследвания са извършени чрез алуминиева сплав 6082-T6 и титанова сплав Ti6Al4V (познат още и като Ti64). Тази двойка е интересна от практична гледна точка поради отличните термични свойства на алуминия спрямо тези на титана и отличните механични и корозионни свойства на титана спрямо алуминия. Именно тези взаимопокриващи се свойства правят тази двойка желана от индустриална гледна точка. Извършени бяха набор от експерименти за определяне на оптимални технологични условия на заваряване на тези двойки. Първоначално бе определено влиянието на офсета [18]. За целта бе използван офсет от d = 0.5 mm към алуминиевата и титановата сплави. При заваряване на детайлите без офсет и с такъв към титана бе наблюдавано усилено формиране на дефекти (пори и пукнатини) в структурата на шевовете. При използване на офсет към алуминия тези дефекти не бяха наблюдавани, което доведе до съответното повишаване на механичните свойства. В следващ труд бяха определени структурата и

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

свойствата на тази двойка при използване на различни радиуси на кръгова осцилация [19]. Определено бе, че използването на осцилация с радиус 0.2 mm подобрява хомогенността на шева и минимизира наличието на дефекти, но въпреки това бяха наблюдавани пукнатини, както в заваръчния шев, така и на границата между него и алуминия. След още по-голям набор от експерименти бе установено, че заваряването на титан и алуминий трябва да се извършва с възможно най-ниска скорост на заваряване при ограничена мощност. В следваща работа [1] за отлични условия на заваряване бяха определени ускоряващо напрежение, ток на лъча, скорост на заваряване. Наложително бе и предварителното подгряване на титановите и алуминиевите основи до 200 °C с цел понижаване на вътрешните термични напрежения. Това доведе до формиране на високоякостни съединения между двата материала без наличието на интерметални съединения и нехомогенности в шева. Бяха извършени и много експерименти с добавяне на различни филъри с цел определяне на тяхното влияние върху структурата и механичните свойства на получените заваръчни съединения. За филъри бяха избрани Nb, Cu и V [20, 21]. В случая на използване на меден филър при заваряването се формираха интерметални съединения на мед и алуминий, които се поместиха в свободното място на границите на кристалните зърна на основната алуминиева матрица. Това доведе до повишаване плътността на шева, а оттам и повишаване на механичната якост. В случая на използване на ванадий и ниобий като филъри не бе наблюдаван положителен ефект върху якостта на заваръчните съединения (т.е. те останаха непроменени).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Електроннолъчевото заваряване е вече доста изследван и установен технологичен процес. Въпреки това не само че още намира приложение в модерната индустрия, но изследванията с цел подобряване приложимостта на метода и формирането на нови разработки са все по-актуални. В това ревю бе обощен процеса на електроннолъчево заваряване. Бе разгледано електроннолъчевото заваряване на еднородни и разнородни метали и сплави. Бе направена съпоставка за влиянието на филъри върху заваръчния процес и респективно върху структурата и свойствата на получените заваръчни съединения. Очевидно бе, че изборът на подходящ филър е едно от най-съществените решения, тъй като не всички биха имали благоприятно влияние върху процеса на електроннолъчево заваряване. В допълнение може да се каже, че определянето на правилните технологични условия е сложен процес, който отнема усърден експериментален труд. Във всеки случай, обаче, нансянето на подходящ филър и използването на правилни технологични условия води до повишаване на механичната якост на заваръчните съединения. Естествено тази методология е все още сравнително нова и възможните комбинации на материали, филъри и начини за тяхното нанасяне са необятни.

Благодарности

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] Kotlarski, G.; Kaisheva, D.; Ormanova, M.; Stoyanov, B.; Dunchev, V.; Anchev, A.; Valkov, S. Improved Joint Formation and Ductility during Electron-Beam Welding of Ti6Al4V and Al6082-T6 Dissimilar Alloys. Crystals, 2024, 14, 373

[2] Yin, Y.; Tian, Y.; Ding, J.; Mitchell, T.; Qin, J. Prediction of Electron Beam Welding Penetration Depth Using Machine Learning-Enhanced Computational Fluid Dynamics Modelling. Sensors, 2023, 23, 8687

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

[3] Saresh, N.; Pillai, M.; Mathew, J. Investigations into the effects of electron beam welding on thick Ti-6Al-4V titanium alloy. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192-193, 83-88
[4] Wang, S.; Wu, X. Investigation on the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy joints with electron beam welding. Materials & Design, 2012, 36, 663-670
[5] Lu, W.; Shi, Y.; Lei, Y.; Li, X. Effect of electron beam welding on the microstructures and mechanical properties of thick TC4-DT alloy. Materials and Design, 2012, 34, 509-515
[6] Kotlarski, G.; Kaisheva, D.; Ormanova, M.; Stoyanov, B.; Dunchev, V.; Anchev, A.; Valkov, S. Electron-Beam Welding of Titanium and Ti6Al4V Alloy. Metals, 2023, 13, 1065
[7] Cam, G.; Kocak, M. Microstructural and mechanical characterization of electron beam welded Al-alloy 7020. Journal of Material Science, 2007, 42, 7154-7161
[8] Noga, P.; Skrzekut, T.; Wedrychowicz, M.; Weglowski, M.; Weglowska, A. Research of Friction Stir Welding (FSW) and Electron Beam Welding (EBW) Process for 6082-T6 Aluminum Alloy. Materials, 2023, 16, 4937
[9] Ferro, P.; Zambon, A.; Bonollo, F. Investigation of electron-beam welding in wrought Inconel 706 – experimental and numerical analysis. Materials Science and Engineering A, 2005, 392, 94-105
[10] Reddy, G.; Murthy, C.; Rao, K.; Rao, K. Improvement of mechanical properties of Inconel 718 electron beam welds – influence of welding techniques and postweld heat treatment. International Journal of Advanced Manufacturing Technologies, 2009, 43, 671-680
[11] Patel, V.; Sali, A.; Hyder, J.; Corliss, M.; Hyder, D.; Hung, W. Electron Beam Welding of Inconel 718. Proceedia Manufacturing, 2020, 48, 428-435
[12] Kar, J.; Roy, S.; Roy, G. Effect of beam oscillation on electron beam welding of copper with AISI-304 stainless steel. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 233, 174-185
[13] Kaisheva, D.; Anchev, A.; Dunchev, V.; Stoyanov, B.; Valkov, S.; Ormanova, M.; Kotlarski, G.; Todorov, V.; Atanasova, M.; Petrov, P. Welding of copper and 304L stainless steel with continuous electron beam. Bulgarian Chemical Communications, 2022, 54, 78-81
[14] Kaisheva, D.; Anchev, A.; Dunchev, V.; Stoyanov, B.; Valkov, S.; Ormanova, M.; Kotlarski, G.; Todorov, V.; Atanasova, M.; Rabadzhiyska, S.; Petrov, P. Study of the structure and mechanical properties of electron-beam-welded dissimilar joints of copper and stainless steel with and without offset. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2240, 012006
[15] Kaisheva, D.; Dunchev, V.; Kotlarski, G.; Stoyanov, B.; Ormanova, M.; Todorov, V.; Atanasova, M.; Valkov, S. Structure and mechanical properties of Cu/Al6082T6 joints produced by welding with scanning electron beam. Journal of the Technical University of Gabrovo, 2023, 66, 46-49
[16] Kaisheva, D.; Anchev, A.; Dunchev, V.; Kotlarski, G.; Stoyanov, B.; Ormanova, M.; Valkov, S. Electron-Beam Welding Cu and AL6082T6 Aluminum Alloys with Circular Beam Oscillations. Crystals, 2022, 12, 1757
[17] Kaisheva, D.; Kotlarski, G.; Ormanova, M.; Anchev, A.; Dunchev, V.; Stoyanov, B.; Valkov, S. Electron Beam Welding of Copper and Aluminum Alloy with Magnetron Sputtered Titanium Filler. Crystals, 2024, 14, 752
[18] Anchev, A.; Kaisheva, D.; Kotlarski, G.; Dunchev, V.; Stoyanov, B.; Atanasova, M.; Todorov, V. Daskalova, P.; Valkov, S. Welding of Ti6Al4V and Al6082-T6 Aloys by a Scanning Electron Beam. Metals, 2023, 13, 1252
[19] Kaisheva, D.; Dunchev, V.; Anchev, A., Stoyanov, B.; Ormanova, M.; Atanasova, M.; Todorov, V. Effect of the beam oscillation on the structure and mechanical properties of electorn beam welded joints of Ti6Al4V ad Al6082-T6 alloys. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2710, 012005
[20] Kotlarski, G.; Kaisheva, D.; Ormanova, M.; Atanasova, M.; Anchev, A.; Dunchev, V.; Stoyanov, B.; Valkov, S. Electron Beam Welding of Dissimilar Ti6Al4V and AL6082-T6 Alloys Using Magnetron-Sputtered Cu Interlayers. Crystals, 2025, 15, 373
[21] Kotlarski, G.; Kaisheva, D.; Dechev, D.; Ivanov, N.; Ormanova, M.; Dunchev, V.; Anchev, A.; Stoyanov, B.; Valkov, S. Electron beam welding of titanium and aluminum alloys wih a vanadium filler. Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 2026, 61, 375-386.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

СЪВРЕМЕННИ ПОДХОДИ И ТЕНДЕНЦИИ В ЕЛЕКТРОННОЛЪЧЕВАТА ОБРАБОТКА НА МЕТАЛИ И СПЛАВИ

ADVANCED APPROACHES AND TRENDS IN ELECTRON-BEAM PROCESSING OF METALS AND ALLOYS

Stefan Valkov[1,2,3], Georgi Kotlarski[1,3], Nikolay Nedyalkov[1,3], Tatyana Koutzarova[1,3], Maria Ormanova[1,2,3], Borislav Stoyanov[2,3], Ivana Ilievska[1,3] , Fatme Padikova[1,2,3]

[1]Institute of Electronics, Bulgarian Academy of Sciences, 1784 Sofia, Bulgaria
[2]Technical University of Gabrovo, 5300 Gabrovo, Bulgaria
[3]Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract
Electron-beam technologies have emerged as an advanced and highly efficient approach for the processing and modification of metals and alloys, offering significant advantages over conventional manufacturing and surface engineering methods. Their ability to provide localized and controllable energy input, rapid thermal cycles, and precise regulation of process parameters makes them particularly suitable for tailoring the structure and functional properties of metallic materials. Recent developments in the field have focused on advanced electron-beam approaches for surface hardening, alloying, welding, and physical vapor deposition, as well as on the integration of electron-beam treatment with complementary technologies such as plasma nitriding and thin-film deposition. These combined strategies contribute to considerable improvements in hardness, wear resistance, corrosion behavior, and overall functional performance of engineering materials. This paper presents an overview of advanced approaches and current trends in electron-beam processing of metals and alloys, with emphasis on surface treatment, alloying mechanisms, and hybrid technological solutions aimed at enhancing material performance and expanding industrial applications.

Keywords: electron-beam processing; metals and alloys; surface modification; electron-beam surface hardening; electron-beam alloying; hybrid treatment technologies.

ВЪВЕДЕНИЕ

Разработването на нови материали с по-добрени функционални характеристики е едно от ключовите направления в съвременната индустрия. Внедряването на иновативни технологии за създаване и модификация на материалите открива широки възможности за приложение в индустриални сектори, вкл. авиационната, автомобилната и железопътната индустрия [1-4].

Сред перспективните подходи за обработка и модификация на метални материали важно място заемат електроннолъчевите технологии. Те се отличават с висока ефективност, добра възпроизводимост на технологичните параметри, кратка продължителност на процеса и възможност за прецизен контрол на енергийното въздействие върху обработвания материал [5]. В сравнение с традиционните методи електроннолъчевата обработка осигурява локализиранп нагряване, по-равномерно разпределение на енергията и по-контролируеми структурни изменения.

Принципът на действие се основава на преобразуването на кинетичната енергия на ускорените електрони в топлинна, което води до формиране на температурно поле

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

от повърхността към обема на материала. Съществена особеност са високите скорости на нагряване и охлаждане – от порядъка на 10^4–10^5 K/s при непрекъснат режим и 10^7–10^8 K/s при импулсен режим. Това създава условия за структурни трансформации, подобряващи механичните, трибологичните и корозионните свойства на металите и сплавите [5].

Понастоящем електроннолъчевите методи се използват при различни видове повърхностна модификация, включително повърхностно закаляване, комбинирани методи за повишаване на твърдостта, електроннолъчево легиране и други подходи за формиране на повърхностни слоеве [6]. Изборът на технология зависи от изискванията към експлоатационните свойства на материала – повишаване на твърдостта, устойчивостта на износване или корозионната устойчивост.

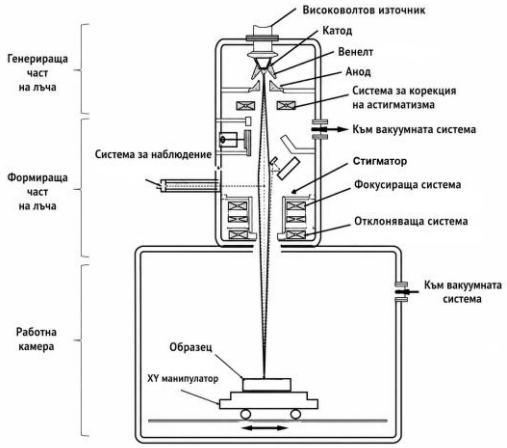
Настоящият доклад представя обобщен анализ на съвременните подходи за електроннолъчева повърхностна обработка и модификация на метали и сплави, с акцент върху повърхностното закаляване, легиране и комбинираните методи в непрекъснат режим на обработка.

ИЗЛОЖЕНИЕ

При електроннолъчевите технологии ключова роля за формирането на структурата и свойствата на обработвания материал имат технологичните параметри на процеса. Особено значение имат ускоряващото напрежение, токът и диаметърът на електронния лъч, както и входната енергийна плътност, които определят количеството и разпределението на енергията върху обработваната повърхност. Контролът върху тези параметри позволява прецизно управление на процесите на нагряване, топене и охлаждане, което влияе пряко върху микроструктурата и експлоатационните характеристики на материала.

Съществено значение имат и честотата на сканиране на електронния лъч и скоростта на движение на образеца [6,7]. Те определят дълбочината на обработения слой, температурното поле, времетраенето на локалното топене и скоростта на охлаждане, а оттам – степента на структурна модификация.

Електронният лъч се генерира чрез електронен източник, при който електроните се ускоряват, фокусират и насочват към обработваната повърхност посредством електромагнитна система. След взаимодействие с материала тяхната кинетична енергия се преобразува в топлинна, което води до локализирано температурно поле и фазови изменения в повърхностния слой. Типична схема на електроннолъчевата система за повърхностна обработка е представена на фиг. 1.

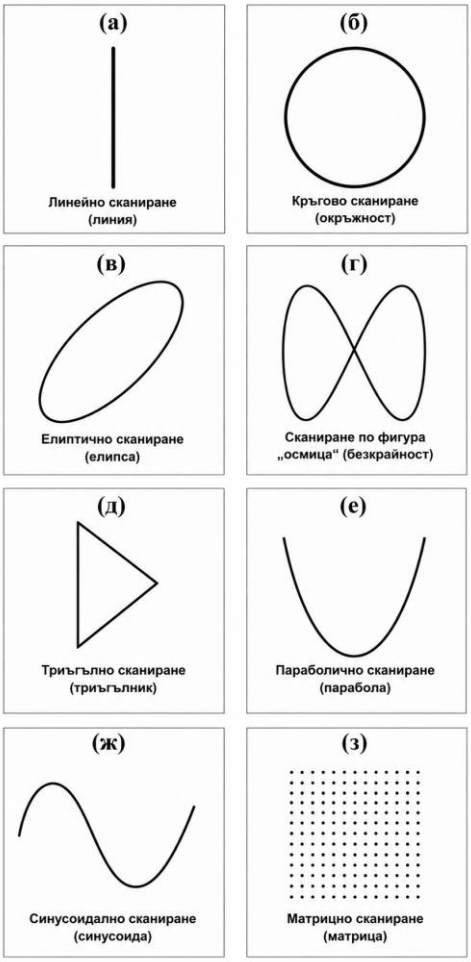


Фиг. 1. *Принципна схема на оборудването за електроннолъчева модификация*

При непрекъснат режим обработката се реализира чрез сканиране на повърхността, като електронният лъч може да следва различни траектории. Използват се линейни, кръгови, елиптични и по-сложни геометрии, които осигуряват различно разпределение на топлината и енергията. Характерни схеми на сканиране са показани на фиг. 2, като изборът им зависи от технологичните цели и изискваните свойства на

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

повърхностния слой. Геометрията на сканиране оказва влияние върху скоростта на охлаждане, времетраенето на съществуване на стопилката и хомогенността на модифицираната зона.



Фиг. 2. *Геометрии на сканиране при електроннолъчева обработка: (а) линия; (б) окръжност; (в) елипса; (г) безкрайност; (д) триъгълник; (е) парабола; (ж) синусоида; (з) матрица [6].*

Линейното сканиране обикновено води до по-интензивно охлаждане, докато кръговите и елиптичните режими благоприятстват по-продължително съществуване на стопилката и по-равномерно разпределение на легиращите елементи. При по-сложни траектории се формират по-комплексни температурни полета, което създава допълнителни възможности за управление на структурата и свойствата на обработваните материали [6].

Изследвания показват, че при постоянна мощност и фиксирана честота на сканиране намаляването на скоростта на движение на образеца повишава температурата в повърхностната зона, докато увеличаването на мощността на електронния лъч води до по-дълбока модифицирана зона [8]. По-високата честота на сканиране обикновено намалява температурата на повърхността и дебелината на обработения слой. Тези зависимости са потвърдени чрез моделиране и експериментални изследвания [8].

Електроннолъчевото повърхностно закаляване е широко използван метод за подобряване на експлоатационните свойства на метали и сплави. Локалното нагряване, последвано от изключително бързо охлаждане, води до формиране на фина микроструктура и повишаване на твърдостта и износоустойчивостта.

Изследвания върху инструментална стомана 5CrMoMn показват, че при ток на електронния лъч 7 mA се наблюдава приблизително двукратно повишаване на твърдостта, докато по-високи стойности водят до нейното намаляване поради редуциране на въглерода и мартензитната фаза [9]. При стомана 30CrMnSiA е установено, че най-висока твърдост се достига при входна енергийна плътност 1.875 kJ/mm², като преобладаваща структурна съставка е мартензитът [10].

Титановите сплави също представляват значителен интерес поради ниската си плътност, добрите механични свойства и корозионната устойчивост, но сравнително ниската им повърхностна твърдост ограничава приложението им при интензивно износване. Изследвания върху сплавите ТА2 и ТА15 показват, че електроннолъчевото закаляване води до рафиниране на структурата, повишаване на твърдостта и

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

формиране на модифициран слой с дебелина до около 25 μm [11,12].

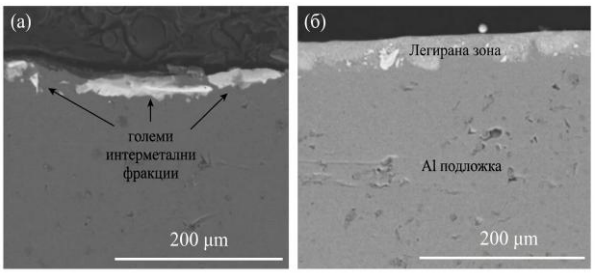
Получените резултати потвърждават, че чрез оптимизация на технологичните параметри електроннолъчевото закаляване може значително да подобри повърхностните свойства на различни метали и сплави.

През последните години комбинираните методи за повърхностна модификация се утвърждават като перспективно направление в инженерството на материалите. Те съчетават електроннолъчева обработка, плазмено азотиране, нанасяне на покрития и други технологии с цел по-ефективен контрол върху структурата и свойствата на повърхностния слой.

Комбинирането на плазмено азотиране и електроннолъчева обработка показва значително повишаване на твърдостта и износоустойчивостта на стомани. При стомана 40Х е отчетено приблизително трикратно увеличение на твърдостта и повече от двукратно подобрение на износоустойчивостта спрямо единично азотиране [13]. Подобни резултати са установени и при инструментални стомани, където комбинираната обработка води до микротвърдост над 1200 HV [14]. Допълнителното нанасяне на CrN покритие допринася за още по-висока твърдост и устойчивост на износване [15].

Електроннолъчевото повърхностно легиране представлява ефективен метод за модификация на метални материали чрез локално разтопяване и въвеждане на легиращи елементи, при което се формират слоеве с подобрени механични, трибологични и корозионни свойства. Сред основните предимства са прецизният контрол върху дълбочината на обработка и ограниченото термично въздействие върху основния материал.

В изследванията на Valkov и сътр. [16-18] е анализирано електроннолъчево легиране на алуминий чрез Ti и Nb. Получените Al–Ti–Nb повърхностни сплави достигат микротвърдост около 800 HV, което е над 20 пъти по-високо спрямо изходния материал. Установено е, че по-ниската скорост на движение на образеца води до по-хомогенна структура и по-равномерно разпределение на легиращите елементи. Характерни микроструктурни особености на формираните Al–Ti–Nb повърхностни сплави са представени на фиг. 3. Наблюдава се, че при по-ниска скорост на движение се формира по-хомогенна структура и по-равномерно разпределение на легиращите елементи, което благоприятства механичните свойства [6,17].



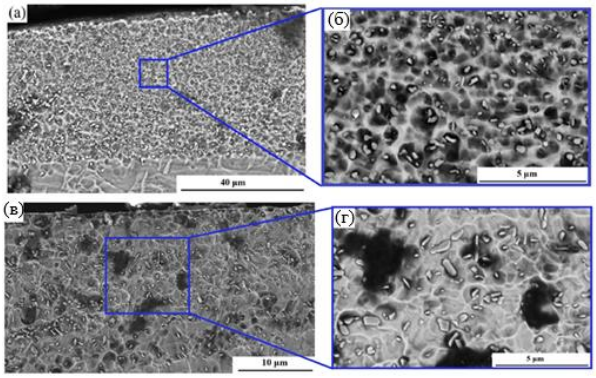
Фиг. 3. *SEM изображения на напречно сечение на Al–Ti–Nb повърхностни сплави, формирани чрез електроннолъчево повърхностно легиране при различни скорости на движение на образеца: (а) по-висока скорост; (б) по-ниска скорост [6,17].*

Подробният анализ показва, че това се дължи на по-интензивни конвективни потоци в стопения слой, породени от по-висок температурен градиент при по-ниски скорости на обработка [16–18].

Друг перспективен подход е формирането на композитни Ti/TiC слоеве чрез въвеждане на въглероден прах и последващо ремелиране [19]. Използването на по-ниска скорост на движение води до по-фина и по-хомогенна структура с по-добри механични свойства. Характерни микроструктурни изображения на Ti/TiC композитните слоеве са представени на фиг. 4, където се наблюдава, че по-ниската скорост способства за по-фина и равномерно разпре-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

делена структура, съпроводена с по-висока микротвърдост [19].



Фиг. 4. *SEM изображения на напречно сечение на Ti/TiC композитни повърхностни слоеве, получени при скорости на движение на образеца: (а, б) 5 mm/s; (в, г) 15 mm/s [19].*

Резултатите показват, че при по-ниска скорост на движение микротвърдостта достига приблизително 2.5 пъти по-високи стойности спрямо изходния титанов материал, докато при по-висока скорост увеличението е около 1.8 пъти. Това потвърждава значението на оптимизацията на технологичните параметри за получаване на повърхностни слоеве със зададени свойства.

Анализът на литературните данни показва, че електроннолъчевото повърхностно легиране е особено перспективен подход за модификация на алуминий, титан и техните сплави. В сравнение с повърхностното закаляване, при което подобренията често са ограничени, легиращият подход позволява многократно повишаване на механичните характеристики и се утвърждава като водеща технология в инженерството на повърхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Електроннолъчевите технологии представляват ефективен подход за обработка и модификация на метали и сплави, осигуряващ прецизен контрол върху нагряването, топенето и структурните изменения в повърхностните слоеве. Благодарение на локализираното топлинно въздействие и управлението на технологичните параметри те позволяват значително подобряване на свойствата на инженерните материали.

Литературните данни показват, че електроннолъчевото повърхностно закаляване повишава твърдостта, износоустойчивостта и надеждността на стомани и титанови сплави. Параметри като енергийна плътност, ток на електронния лъч и скорост на движение на образеца оказват съществено влияние върху микроструктурата и свойствата на обработените слоеве.

Комбинираните методи, включващи електроннолъчева обработка, плазмено азотиране и покрития, показват значителен потенциал за повишаване на микротвърдостта, износоустойчивостта и експлоатационната стабилност.

Перспективно направление е електроннолъчевото повърхностно легиране, при което чрез въвеждане на легиращи елементи се формират повърхностни сплави и композитни слоеве с подобрени свойства. Оптимизацията на технологичните параметри допринася за повишаване на твърдостта, структурната хомогенност и устойчивостта при експлоатация.

В обобщение, електроннолъчевите технологии заемат важно място в модификацията на материали, като създават възможности за разработване на метални материали с подобрени характеристики и разширен индустриален потенциал.

Благодарности

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

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

ЛИТЕРАТУРА

[1] Yusuf S, Cutler S, Gao N. The Impact of Metal Additive Manufacturing on the Aerospace Industry. Metals 2019; 9:1286.
[2] Portoles L, Jorda O, Jorda L, Uriondo A, Esperson-Miguez M, Perinpanayagam S. A Qualification Procedure to Manufacture and Repair Aerospace Parts with Electron Beam Melting. J. Manuf. Syst. 2016; 41:65–75.
[3] Juechter V, Franke M, Merend T, Stich A, Korner C, Singer R. Additive Manufacturing of Ti-45Al-4Nb-C by Selective Electron Beam Melting for Automotive Applications. Addit. Manuf. 2018; 22:118–126.
[4] Murr L, Gaytan S, Ceytan A, Martinez E, Martinez J, Hernandez D, Machado B, Ramirez D, Medina F, Collins S, et al. Characterization of Titanium Aluminide Alloy Components Fabricated by Additive Manufacturing Using Electron Beam Melting. Acta Mater. 2010; 58:1887–1894.
[5] Weglowski M, Blacha S, Philips A. Electron Beam Welding—Techniques and Trends: Review. Vacuum 2016; 130:72–92.
[6] Valkov S, Ormanova M, Petrov P. Electron-Beam Surface Treatment of Metals and Alloys: Techniques and Trends. Metals 2020; 10:1219.
[7] Bocharov A, Murygin A, Laptenok V. Calculating the Geometric Parameters of the Distribution of Electron Beam Energy Density on Its Section in EBW. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2018; 450:032010.
[8] Angelov V, Ormanova M, Kaisheva D, Lazarova R, Dimitrova R, Petrov P. Selective Electron Beam Surface Alloying of Aluminum with TiCN Nanoparticles. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 2019; 440:88–94.
[9] Wei D, Wang X, Wang R, Cui H. Surface Modification of 5CrMnMo Steel with Continuous Scanning Electron Beam Process. Vacuum 2018; 149:118–123.
[10] Fu Y, Hu J, Shen X, Wang Y, Zhao W. Surface Hardening of 30CrMnSiA Steel Using Continuous Electron Beam. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 2017; 410:207–214.
[11] Gao Y. Surface Modification of TA2 Pure Titanium by Low Energy High Current Pulsed Electron Beam Treatments. Appl. Surf. Sci. 2011; 257:7455–7460.
[12] Gao Y. Influence of Pulsed Electron Beam Treatment on Microstructure and Properties of TA15 Titanium Alloy. Appl. Surf. Sci. 2013; 264:633–635.
[13] Dimitrov D, Aprakova M, Valkanov S, Petrov P. Electron Beam Hardening of Ion Nitrided Layers. Vacuum 1998; 49:239–246.
[14] Zenker R. Electron Meets Nitrogen: Combination of Electron Beam Hardening and Nitriding. Int. Heat Treat. Surf. Eng. 2009; 3:141–146.
[15] Grumbt G, Zenker R, Spies H, Franke R, Haase I. Improvement of the Wear Behaviour of Highly-Loaded Components and Tools by Multi-Combined Surface Treatment. Mater. Eng. 2014; 21:1–10.
[16] 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.
[17] Valkov S, Neov D, Bezdushnyi R, Beskrovnyi A, Kozlenko D, Petrov P. Study of the Microstructure, Crystallographic Structure and Thermal Stability of Al–Ti–Nb Alloys Produced by Selective Electron Beam Alloying. J. Surf. Investig. X-ray Synchrotron Neutron Tech. 2018; 12:436–441.
[18] Valkov S, Petrov P. Electron Beam Additive Manufacturing of Light Metals. J. Tech. Univ. Gabrovo 2019; 59:17–19.
[19] Valkov S, Nedeva D, Dunchev V, Padikova F, Ormanova M, Stoyanov B, Nedyalkov N. Fabrication and Characterization of Ti/TiC Composite Layers by an Electron-Beam Surface Modification. Coatings 2023; 13:951.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ОБРАБОТВАЕМОСТТА НА БЪРЗОРЕЖЕЩА СТОМАНА Р6М5К5 ПРИ ИЗРАБОТВАНЕ НА КОНУСЕН ЗЕНКЕР

STUDY OF HIGH-SPEED STEEL P6M5K5 MACHINABILITY IN THE MANUFACTURE OF CONICAL COREDRILL

Hristo Radev
TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract
The article presents a study of the processing of steel P6M5K5, by the criterion of toollife T (min) when processing a conical coredrill with three different carbide inserts from the companies CERATIZIT, SECO and PALBIT. In addition to the methods of statistical evaluations, an accurate idea is given of which of all the inserts is most suitable for processing a given detail. A comparative economic assessment of the tool costs when using the tools used is made.

Keywords: machinability, high-speed steel P6M5K5, statistical analysis, toollife, comparison.

ВЪВЕДЕНИЕ

Технологичната характеристика обработваемост изразява степента на способност на метала да се поддава на обработване с режещ инструмент. В теорията и практиката обработваемостта на метала се възприема интуитивно, като много често се влага различен смисъл [1-4]. Обработваемостта на материала е винаги конкретна и зависи от процеса на механично обработване, видът на инструменталния материал и условията на работа и следователно, не трябва да бъде степенувана на добра или лоша.

Обработваемостта на метала е непосредствено свързана с режещата способност на инструмента. Режещата способност изразява способността на режещия клин да запазва своята форма достатъчно дълго време при топлинно и механично натоварване. Тези понятия изразяват способността на метала да износва инструмента и способността на инструмента да противостои на това износване [5-9].

Определянето на обработваемостта на материала става чрез изпитване, изследване, сравняване и оптимизиране. При изпитването се установява дали материала се поддава на обработване. При изследването се определя степента на влияние на факторите върху приет параметър. При сравняването обработваемостите се съпоставят по даден параметър за два или повече материала [10-12]. Обработваемостта е основна характеристика на метала с която се изразява влиянието на физико-механичните, механичните и технологичните му свойства в процеса на рязане. Тя се оценява чрез един или няколко от следните параметри:

- допустима скорост на рязане V_c при зададена трайност T на инструмента;
- силите на рязане F_z, F_y и F_x или мощността на рязане P_p;

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

- качеството (грапавостта R_a и точността IT) на обработената повърхнина;
- температурата на рязане θ и разпределението й между стружката, обработваемия детайл и инструмента;
- видът, формата, размерите и деформацията на отделяните стружки;
- производителността Q или технологичната себестойност К;
- стабилността и устойчивостта на процеса рязане;

Операцията струговане е основна операция в процеса на обработване и за някой детайли и повърхнини се явява окончателна обработка. В този случай ограничителен критерий на обработваемостта е зададената грапавост на обработваната повърхнина която за работната част е от порядъка на Ra 0.63, а за присъединителните повърхнини Ra 0.8.

При обработване на кобалтова бързорезна стомана Р6М5К5 силно влияние върху обработваемостта оказва кобалтът. Поради 5% му съдържание обработваната повърхнина се получава с по-ниска грапавост и по-висока износоустойчивост.

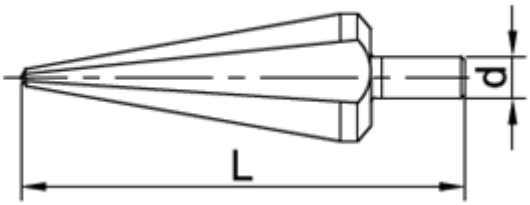
За да се представи основателна икономическа оценка на обработваемостта на един инструмент е необходимо да се направи сравнителна оценка на трайността на няколко инструмента и да се направи качествен сравнителен анализ.

Целта на статията е да се оцени обработваемостта на бързорезна стомана Р6М5К5 при бработване на конусен зенкер с три различни твърдосплавни сменяеми пластини на фирмите CERATIZIT, SECO и PALBIT, чрез методите на дисперсионния анализ и да се направи сравнителна икономическа оценка на инструменталните разходи при използване на различните инструменти.

ИЗЛОЖЕНИЕ

За анализ на обработваемостта на стомана Р6М5К5 е избран критерия трайност Т (min) на инструмента, при обработване на детайл конусен зенкер.

Обработени са три серии от детайла с форма показани на фиг.1. и размери съответно L=100 mm, d=9 mm и обхват на конусната част 4-31 mm.



***Фиг. 1**. Конусен зенкер ф4-ф31*

Обработваният материал е стомана Р6М5К5 (1.3243) с химичен състав и физикомеханични свойства представени в Таблица 1 [13].

Изследваните детайли са обработени върху струг с CNC управление Mazak Quick Turn 10, показан на фиг. 2, със следните параметри: мощност 7.5 kW, честотата на въртене $n_c = 4000\ min^{-1}$.

***Таблица 1.** Физикомеханични свойства и химичен състав на стомана Р6М5К5*

Обработван материал	Твърдост, HB	Якост на опън, MPa	Граница на провлачване $Rp_{0,2}$, N/mm^2	Относително удължение A, %	Химичен състав, %
P6M5K5	269	850	510	12	C-0.91, Si-0.3, Mn-0.3, Ni-0.4, Cr-3.9, Mo-5.1, W-6.2, Co-4.9, V-1.9

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

***Фиг. 2**. Струг Mazak Quick Turn 10*

Обработването на детайлите е от прътов материал, като програмното управление на външния контур е чрез поредица от преходи реализирано при постоянен режим на рязане: скорост на рязане Vc = 150 m/min; дълбочина на рязане a_p = 2 mm; подаване f = 0.2 mm/rev.

В качеството на режещ инструмент е използван стругарски нож PDJNR 20 x 20 с металокерамични сменяеми пластини P25–DNMG 150608 на три производителя - CERATIZIT, SECO и PALBIT [14-16]. Използвани са по две пластини от вид, всяка от която има по четири режещи ръба.

За сравнение на резултатите от обработваемостта на детайлите чрез струговане е проведен статистически анализ, който включва проверка на две статистически хипотези - за равенство на две математически очаквания; и за равенство на две дисперсии.

Статистическата проверка на хипотези е метод, чрез който се решават редица задачи за сравняване и оценка в инженерната практика. В основата на метода е статистически критерий, който определя правилата, по които формулираната нулева хипотеза се приема или отхвърля.

Проверката на статистическите хипотези е проведена в съответствие с методиката, представена в [17].

В качеството на входен фактор на проведения експеримент са приети режещите пластини на трите фирми, който имат не количествена а качествена характеристика. Изходен параметър на процеса е трайността на режещата пластина, измервана в брой обработени детайли T1 и време на работа T (min).

В процеса на изследването факторът A приема 3 различни стойности (нива) и за всяко от тях има по 8 наблюдения над изходния параметър X.

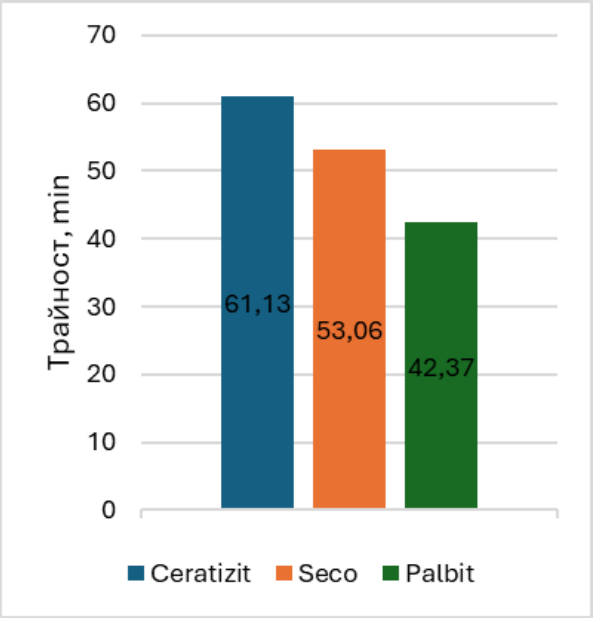
В съответствие с представената методика и с помощта на програмния продукт QstatLab [18] е проведен статистически анализ на данни, като стойностите на изходния параметър T и T1 за различните наблюдения са представени в Таблица 2.

***Таблица 2.** Статистически данни*

№ на наблюдението i=1,2,…8	Ниво на фактора A(j = 1,2,3)					
	A_1 CERATIZIT		A_2 SECO		A_3 PALBIT	
	T_1 (броя)	T (мин.)	T_1 (броя)	T (мин.)	T_1 (броя)	T (мин.)
1	33	49.5	40	60	37	55.5
2	50	75	37	55.5	39	58.5
3	36	54	28	42	35	52.5
4	48	72	35	52.5	31	46.5
5	32	48	33	49.5	25	37.5
6	41	61.5	39	58.5	20	30
7	47	70.5	30	45	18	27
8	39	58.5	41	61.5	21	31.5
$\overline{x_j}$	61.13		53.06		42.37	
$\overline{x}$	52.19					

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Анализът на резултатите показва, че най-високи са средните стойности на трайността на пластината на фирма CERATIZIT, следвана от тези на SECO и PALBIT, представени на фиг. 3.



***Фиг. 3**. Трайност на инструментите*

От графиката на фиг.3 се вижда, че относителния преразход на пластини SECO спрямо CERATIZIT е 13 %, а този на твърдосплавни пластини PALBIT спрямо CERATIZIT е 30.6%.

Избирането на най-подходящия от трите инструмента по себестойност е важен елемент от оптимизирането на технологичния процес на струговане.

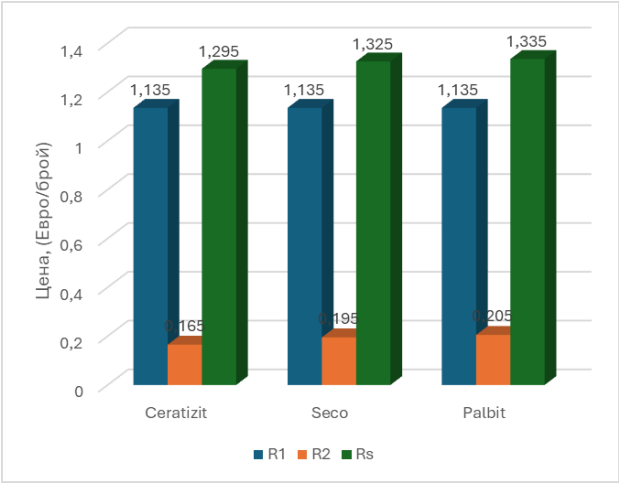
Известно е, че максимална икономическа ефективност се постига чрез търсене на най-производителния режим, гарантиращ определена трайност, а в случая и грапавост.

От направеното сравнение на трите инструмента могат да се направят следните икономически изводи:

Независимо, че пластините на PALBIT са най-евтини, поради по-ниска трайност те реализират най-големи инструментални разходи за единица време. С най-малки инструментални разходи се обуславят пластините произведени от CERATIZIT.

Анализът на разходите за операция „струговане“ на конусен зенкер показва, че разходите за работно място R1 са значително по-големи от разходите за металорежещи инструменти R2 около 5 пъти. Общите разходи Rs (Rs=R1+R2) са най-високи при използване на пластини PALBIT, а най-ниски при CERATIZIT – съответно 1.335 €/бр. и 1.295 €/бр. Възможно е разходите за работно място да се намалят като се премине от двусменен на трисменен режим на работа, когато годишния фонд работно време би нараснал от 2032 на 3048 часа. По този начин вместо R1 =1.135 ще получим R1=0.998, при което разходите за работно място ще намалеят с около 12 %.

Инструменталните разходи не зависят от сменността и биха останали същите. Графично това е показано на фиг. 4 за двусменен режим на работа.



***Фиг. 4**. Разходи за производство на конусен зенкер*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статията е представено изследването на обработваемостта на стомана Р6М5К5, по критерия трайност Т (min) на инструмента, като са изследвани три твърдо-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

сплавни пластини от различни производители (CERATIZIT, SECO и PALBIT) и благодарение на методите на статистическите оценки е дадена точна представа за това, коя от всичките пластини е най-подходяща за обработването на конусен зенкер.

Показаните средни трайности на трите пластини са високи спрямо стандартната препоръчителна стойност от 15 мин, което налага извода, че трябва да се използва режим с по-високи скорости на рязане, при което ще се намали средната трайност на един режещ ръб и ще се увеличат разходите за инструменти, но ще се намали разходът за обработване на един детайл поради намаляването времето за обработка.

За да се подобри обработваемостта е препоръчително различните повърхнини да се обработват с различни инструменти, тъй като машината позволява това, а също така и да има отделен режим на рязане за тези повърхнини.

Благодарности

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] Andonov, I. Machinability. Avangard Prima, Sofia, 2012.
[2] Aleksandrova, I. Cutting the materials. University Publishing House "V. Aprilov", Gabrovo, 2015.
[3] Toenshoff, H.K., B. Denkena. Basics of Cutting and Abrasive Processes. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2013.
[4] Radev, Hr., BASICS OF TURNING, TechCo-2025, Lovech, 165-169, ISSN 2535-079X
[5] Pacella M., Colosimo B. M., Multilinear principal component analysis for statistical modeling of cylindrical surfaces: a case study, Pages 507-525 | Accepted 18 Aug 2016, Published online: 06 Sep 2016, https://doi.org/10.1080/16843703.2016.1226710
[6] Radev, Hr., Yakimov Hr., Chip formation and types of chips, Mechanical Engineering and Mechanical Science, Varna, 2026, 38 (1-XXI), 30-34, ISSN; 1312-8612
[7] Stephenson, D. A., J. S. Agapio. Metal cutting theory and practice. Taylor &Francis Group. USA, 2011.
[8] Nikolcheva, G. Cutting tools. «Interpress», S. 2003
[9] Juneja, B., G. Sekhon. Nitin Seth. Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools. New Age International Ltd, New Delhi, 2005.
[10] Aleksandrova, I.S. Roughness of the machined surface under layer conditions. Proceedings of Section A "Cutting" of the 5th International Scientific Conference AMTECH'99, Plovdiv, 1999, 172-178.
[11] Andonov, I. Cutting of Materials. Softreid, Sofia, 2001.
[12] Makedonski, A. Cutting of materials. Publishing House of the Technical University of Sofia, 2011
[13] Steel and Cast Iron Standards; EN 10277: Steel grades/numbers. Available online: http://www.steelnumber.com /en/standard_steel_eu.php?gost_number=10277 (accessed on May 2026).
[14] https://cuttingtools.ceratizit.com/bg/bg/
[15] "Seco Cutting Tool," [Online]. Available:https://www.secotools.com/article/20857?language=en. [Accessed: May, 2026].
[16]"Palbit-Products Cutting" [Online]. Available: https://www.palbit.pt/en/products/cutting/. [Accessed: May, 2026].
[17] A. Aleksandrov and I. Aleksandrova, Theory of Experiment, Gabrovo, Bulgaria: Experess, 2012.
[18] I. N. Vuchkov and I. I. Vuchkov, Statistical methods of quality control, robust engineering, planning, modeling and optimization, QStatLab, v 5.3, 2009

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

ЗАКРЕПВАНЕ НА РЕЖЕЩИ ПЛАСТИНИ ВЪРХУ ДЪРЖАЧИ ПРИ СТРУГОВАНЕ

FIXING CUTTING INSERTS ON HOLDERS DURING TURNING

Hristo Radev
TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract

According to their design, cutting tools are divided into monolithic, composite and modular. Knives with non-sharpening multi-edged inserts with modular tools, which are widely used especially in machining parts on CNC lathes. The large variety of inserts determines the presence of different systems for fastening them in the holders, which are designated by the letters D, P, S, C and M. This article presents possible fastenings of the types of interchangeable inserts on lathe holders, as indicated in these applications and suggests them.

Keywords: fixing, cutting inserts, replaceable inserts, holders, turning.

ВЪВЕДЕНИЕ

Според конструкцията си режещите инструменти се подразделят на монолитни (цели), съставни и сглобяеми [1-3].

Целите инструменти са изработени от един инструментален материал, като в сравнение с другите видове се характеризират с най-голяма стабилност, отсъствие на вътрешни напрежения и най-голям разход на инструментален материал. Използването на цели ножове е икономически неизгодно, защото само една малка част от скъпия инструментален материал се използва непосредствено за рязане. Затова цели ножове се изработват предимно от поевтините въглеродни и легирани инструментални стомани.

Ножовете от бързорежеща стомана, метало- и минералокерамика и свръхтвърди материали се изработват съставни или сглобяеми. Режещата част представлява пластина, закрепена към главата на ножа [4-6].

Съставните инструменти се изработват от различни материали (режещата част – от инструментален материал, тялото – от конструкционна стомана). Характеризират се с много по-рационално използване на инструменталния материал в сравнение с монолитните инструменти и с по-голяма стабилност от сглобяемите инструменти. Техни недостатъци се явяват вътрешните напрежения, получени при съединяване на материалите, чиито стойности са свързани с технологията на съединяване (заваряване или запояване). Също така, в сравнение с монолитните инструменти, те са с по-малка якост и надеждност [4-6].

Съставните ножове са презаточваеми и непрезаточваеми. Закрепването на пластината при ножовете с презаточваеми пластини се извършва чрез спояване или зава-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

ряване. Пластините се разполагат по различен начин върху главата на ножа: успоредно на предната повърхнина; успоредно на задната повърхнина; под наклон във врязано или в открито гнездо.

При избиране на начина на разполагане на пластините се изхожда от съображения за минимален разход на материал при презаточване, технологичност на изработване на ножа и закрепване на пластината, благоприятно натоварване на пластината от силите на рязане [4-6].

Сглобяемите инструменти се състоят от отделни механично закрепени елементи и подлежат на многократно разглобяване и сглобяване. Делът им в общото количество произвеждани режещи инструменти от всякакъв вид непрекъснато нараства и в днешно време достига около 90%. Основните им предимства са: възможност за единична смяна на счупени зъби; възможност за регулиране на размерите; многократно използване на тялото и на други части; облекчена термообработка; максимална производителност и надеждност поради липса на вътрешни напрежения и осигуряване на еднаквост във всички геометрични елементи на режещата част. Като техни недостатъци могат да се посочват сложната конструкция, високата себестойност и помалката стабилност [1-6].

Ножовете с непрезаточваеми многоръбови пластини (Фиг. 1) са сглобяеми инструменти, които намират широко приложение особено при обработване на детайли върху стругове с ЦПУ [7-10]. Формата, размерите и означенията на пластините от метало- и минералокерамика и свръхтвърди материали са разглеждани в много източници и затова тук няма да им отделяме голямо внимание.

Целта на статията е да се представят различните видове закрепвания на сменяемите пластини върху струговите държачи, както и да се изяснят различните приложения и предимствата им при конкретна обработка.

***Фиг. 1**. Ножове със сменяеми пластини*

ИЗЛОЖЕНИЕ

Държачите за струговите инструменти със сменяеми пластини най-често се изработват от закалена инструментална стомана. Те биват десни и леви, призматични (от 8 до 32 mm, като могат да бъдат квадратни или правоъгълни) за външна обработка и кръгли (от Ø 12 до Ø 40 mm – монолитни или с отвор за охлаждане) за вътрешна обработка. Налични са също държачи HSK и UTS (Фиг. 2) [11-14].

***Фиг. 2**. Различни видове присъединяване на ножове със сменяеми пластини*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

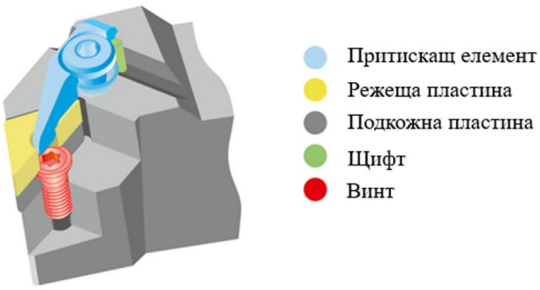
Чрез ъгъла на наклона на главния режещ ръб се определя мястото на възникването на контакт на стружката върху режещия ръб и това е от значение за отвеждането на стружката (фиг. 3) и за определянето на вида на геометрията на инструмента. При λs=0˚имаме неутрална геометрия, при λs>0˚ е положителна, а при λs<0˚ – отрицателна геометрия [5, 12].

Фиг.3. *Определяне геометрията на ножа*

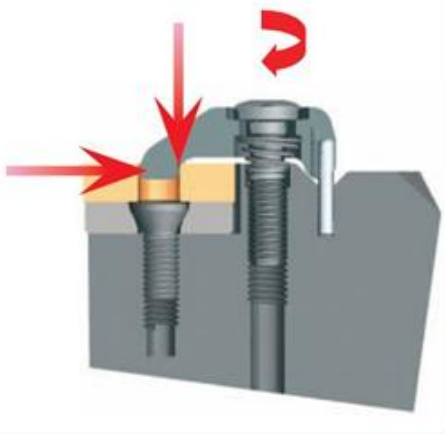
Голямото многообразие от пластини определя наличието на различни системи за закрепването им в държачите на инструментите. Тези системи според стандарт ISO 5608 се обозначават с буквите D, P, S, C и M [1, 2].

Държачите с D закрепване осигуряват надеждно и прецизно позициониране на пластината поради двоен притискащ ефект. Те осигуряват лесна работа и са първи избор за външно струговане при затягане на пластини с отвор с отрицателна геометрия – фиг. 4.

Базирането се осъществява по отвора на пластината в две посоки на затягане при завъртане на винта, като при затягане на пластината, тя се придърпва едновременно към контактната повърхност и опорната повърхност – фиг. 5 [12].



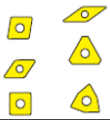
Фиг. 4*. Държач с D закрепване [12]*



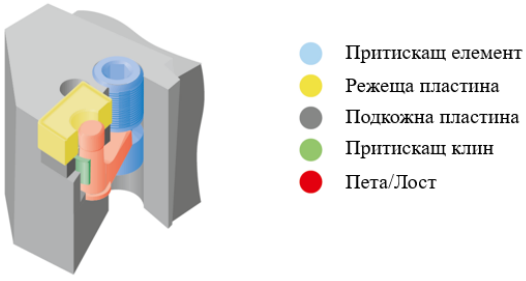
Фиг. 5*. Базиране на държач с D закрепване*

В таблица 1 са представени формите и вида на пластините, както и препоръчителните режими на рязане при фино, средно и грубо струговане който може да осигури този вид закрепване.

Таблица 1. *Област на приложение на държач с D закрепване*

Дълбочина /Подаване						Форма на пластина	Пластина – форма на предна повърхнина
a_p	f	a_p	f	a_p	f		
0.3 - 2.0	0.08 - 0.25	2.0 - 6.0	0.2 - 0.6	5.0 - 15.0	0.5 - 1.5		
✓		✓		✓			

Системата за затягане с P закрепване е подходяща за всички пластини с централен отвор – фиг. 6. Задействащият винт за затягане може лесно да се достигне от горната и долната страна на държача. В отключено положение съставните части не се разхлабват и не могат да паднат.

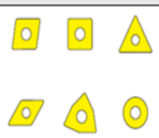


Фиг. 6*. Държач с P закрепване [12]*

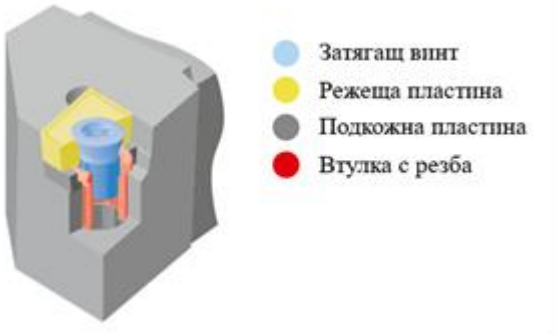
Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Този вид закрепване е подходящо за пластини с отрицателна геометрия и отвор. В таблица 2 са представени областите на приложение който може да осигури този вид закрепване.

Таблица 2. *Област на приложение на държач с P закрепване*

Дълбочина /Подаване						Форма на пластина	Пластина – форма на предна повърхнина
a_p	f	a_p	f	a_p	f		
0,3 - 2,0	0,08 - 0,25	2,0 - 6,0	0,2 - 0,6	5,0 - 15,0	0,5 - 1,5		
✓		✓		✓			

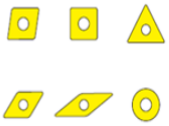
Държачите със закрепване само с винт на пластината са известни като форма S – фиг. 7. При тях има надеждно затягане на винта, което осигурява сигурно свързване на сменяемата пластината към държача на инструмента, като се използва винт с конусна повърхнина за базиране.



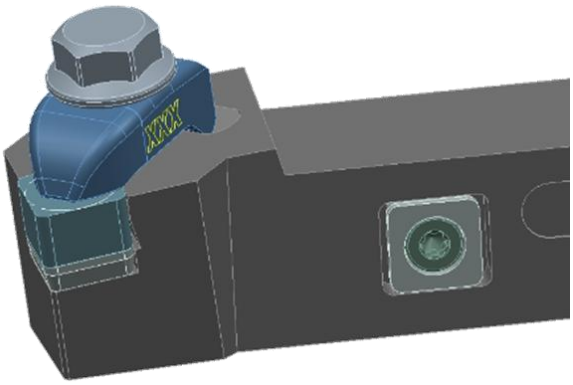
Фиг. *7. Държач с S закрепване [12]*

Отвеждането на стружките не е възпрепятствано от пречещи затягащи елементи и поради неутралното положение на пластината, ефективният ъгъл на наклон е идентичен с този на геометрията от пластината. Този вид закрепване е първи избор и подходящ за пластини с отвор с положителна геометрия. Това закрепване не е подходящо за груба обработка и за двустранни пластини. В таблица 3 са представени областите на приложение при който може да се използва този вид закрепване.

Таблица 3. *Област на приложение на държач с S закрепване*

Дълбочина /Подаване						Форма на пластина	Пластина – форма на предна повърхнина
a_p	f	a_p	f	a_p	f		
0,3 - 2,0	0,08 - 0,25	2,0 - 6,0	0,2 - 0,6	5,0 - 15,0	0,5 - 1,5		
✓	✓						

Държачите със С закрепване осигуряват много стабилно базиране на сменяемата пластина и винаги са първи избор за външно стругване където има големи натоварвания на пластини без отвор с отрицателна геометрия. Много често притискащият елемент е направен от твърда сплав за да гарантира стабилността на пластината и висока износоустойчивост при тежките условия на работа – фиг. 8. Този вид закрепване е особено подходящ за сменяеми керамични и CBN пластини.

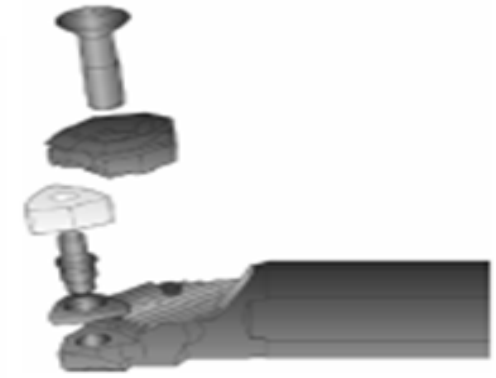


Фиг. 8*. Държач с С закрепване [11]*

При М закрепването има затягане на сменяемата пластина с винт и отделно затягане чрез притискач по предната повърхнина на пластината, но не в отвора. Този вид закрепване е първи избор за вътрешно

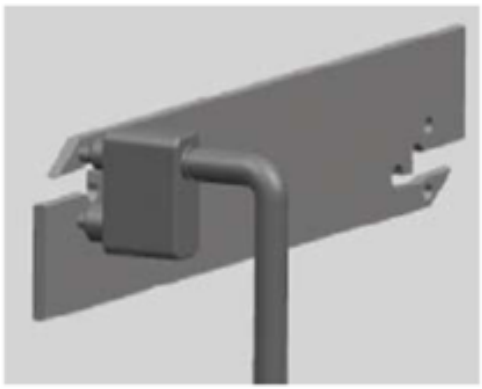
Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

струговане при пластини с отвор и отрицателна геометрия – фиг. 9.



Фиг. 9. *Държач с М закрепване [14]*

При държачите за отрезни и канални сменяеми пластини при струговане няма стандартизирани закрепвания, като там много от фирмите производители на държачи имат разработени собствени системи за затягане на пластината. Една от най-често използваната система на затягане която се среща при много от производителите е показана на фиг. 10. При нея специален ключ със щифтове се поставя в отвори изработени на държача (фиг. 10-а). За да се монтира пластината или извърши подмяната ѝ, ключът се завърта на 45˚-160˚ и така се освобождава гнездото (фиг. 10-б). След като се постави нова сменяема пластина, ключът се завърта обратно в първоначалното му положение и се изважда, като по този начин се осъществява затягането на пластината (фиг. 10-в).



а)

б)

в)

Фиг. 10. *Закрепване на отрезна/канална пластина [13]*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представени са различните видове закрепвания на сменяемите пластини върху стругови държачи, както са посочени различните приложения и предимствата им при избора.

В съвременното машиностроене е необходимо да се спазват препоръките на производителите за да се постигне оптимален резултат при работа. Не трябва да се смесват части (компоненти) от различни видове закрепвания (въпреки, че много често на пръв поглед изглеждат еднакви). Дори и стандартизирани, всеки производител внася някакви корекции при своите системи и така много често те стават не заменяеми и подмяната им с неправилните елементи би довело до осезаеми повреди или ремонти който надвишават цената на самия държач.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Важно е да се отбележи, че не всички производители на инструменти предлагат пълната гама на всички държачи и затова работника трябва да се съобразява с наличните когато прави своя избор.

Благодарности

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] Aleksandrova, I. Cutting the materials. University Publishing House "V. Aprilov", Gabrovo, 2015.
[2] Nikolcheva, G. Cutting tools. «Interpress», S. 2003.
[3] Makedonski, A. Cutting of materials. Publishing House of the Technical University of Sofia, 2011.
[4] Andonov, I. Cutting of Materials. Softreid, Sofia, 2001.
[5] Radev, Hr., BASICS OF TURNING, TechCo-2025, Lovech, 165-169, ISSN 2535-079X
[6] Juneja, B., G. Sekhon. Nitin Seth. Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools. New Age International Ltd, New Delhi, 2005.
[7] Radev, Hr., Yakimov Hr., Chip formation and types of chips, Mechanical Engineering and Mechanical Science, Varna, 2026, 38 (1-XXI), 30-34, ISSN; 1312-8612
[8] Juneja, B., G. Sekhon. Nitin Seth. Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools. New Age International Ltd, New Delhi, 2005.
[9] Stephenson, D. A., J. S. Agapio. Metal cutting theory and practice. Taylor &Francis Group. USA, 2011.
[10] Toenshoff, H.K., B. Denkena. Basics of Cutting and Abrasive Processes. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2013.
[11] ww.secotools.com (Accessed May, 2026)
[12] https://cuttingtools.ceratizit.com (Accessed May, 2026)
[13] www.korloy.com, (Accessed May, 2026)
[14] https://www.zccct-europe.com/en/tools, (Accessed May, 2026)

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

ПРИЛАГАНЕ НА АЛГОРИТЪМА K-MEANS ЗА КЛЪСТЕРИРАНЕ И АНАЛИЗ НА ПРОСТРАНСТВЕНО-ВРЕМЕВИ ТРАНСПОРТНИ ДАННИ

APPLICATION OF THE K-MEANS ALGORITHM FOR CLUSTERING AND ANALYSIS OF SPATIO-TEMPORAL TRANSPORT DATA

Teodora Mecheva
Technical University of Sofia, branch Plovdiv; teodora.mecheva@tu-plovdiv.bg
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract

Clustering temporal traffic data can improve road safety and efficiency in Intelligent Transportation Systems. The aim of the study is to analyse spatio-temporal transport data in order to extract traffic characteristics on the section of St. Petersburg Boulevard in Plovdiv. The present study is part of a larger group of studies that apply conventional methods for clustering data. The data are initially grouped into 24-hour time series for each direction, missing values are filled, and then K-means clustering of speed and number of vehicles passed is applied. The number of clusters is determined by the Silhouette score, and the results are visualized via MDS transformation. The results show that traffic flow in the direction of the Ring Road exhibits greater variability - the traffic volume fluctuates within a wider range throughout the day compared to the traffic heading toward the city Center.

Keywords: K-Means; clustering; traffic patterns; intelligent transport.

INTRODUCTION

In modern urban environments, the efficient management of transportation systems has become one of the most critical challenges for urban planning and sustainable development. The proliferation of digital infrastructure—ranging from GPS-enabled devices to traffic flow sensors—generates vast amounts of data daily. This "Big Data" in transport offers unprecedented opportunities to understand mobility patterns, reduce congestion, and optimize public infrastructure [1-3].

Extracting actionable insights from raw, high-dimensional transport datasets requires robust data mining and machine learning techniques. Among these, cluster analysis stands out as a powerful tool for discovering hidden structures within data without prior labeling. This study focuses on the application of the K-Means algorithm, a cornerstone of unsupervised learning, due to its efficiency and scalability in processing large-scale spatial and temporal datasets [4-5].

The primary objective of this research is to categorize transportation data into meaningful groups to identify key mobility trends, such as peak travel intervals, and anomalous patterns in the network. The paper details the experimental workflow, including data preprocessing, constructing time series, handling missing values, the selection of the optimal number of clusters using the Silhouette score, and a interpretation of the experimental results of clustering.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

METHODS

This section presents the methods used for data processing and analysis. The main stages of data preparation, time series construction, missing value handling, similarity measurement, clustering, and visualization of results are discussed. In the experimental stage of this study, a variant in which an additional step - data normalization was also investigated. The final result of clustering in this case was that the data formed a dense, homogeneous cluster, which indicates that the shape of the traffic load and the speed is similar. The current variant was chosen in order to be able to see the values of the daily profiles on a real scale. Figure 1 presents a chart of the pipeline. The ovals represent the stages at which data is outputed.

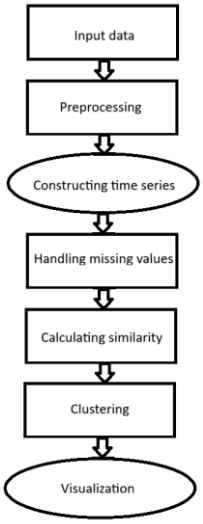


***Fig. 1**. The pipeline of the used methodology.*

The following subsections of this section discuss the stages of the methodology, with the clustering step including an additional stage - selecting the number of clusters.

2.1. Preprocessing and Input Data.

In the experiment is used data for 2022, 2023 and 2024 from the road equipment on St. Petersburg Blvd. of the Technical University of Sofia, Plovdiv Branch in Plovdiv. It was necessary to use such a long period because there are many days for which there are no records. The data contain timestamp, direction and information about the number of vehicles passing and the average speed. The data are in the following format:

date Direction v_count v_vel
1/20/2023 13:00 Ring Road 426 43.93
1/20/2023 13:00 Center 312 48.46

2.2. Constructing time series.

The time series are constructed by forming a vector of 24 points for each day, corresponding to an hour of the day. The rows represent a day, and the columns a combination of direction and time. Separate matrices are formed for the two directions - Center and Ring Road, as well as for speed and number of vehicles.

2.3. Handling missing values

Days for which data is not available are not processed. Missing hours are filled by 2D linear interpolation. The value is calculated as a weighted average of the closest observed values - c1, c2 and c3, with the weights λ depending on the geometric arrangement of the points.

$$c_{d,h}=\lambda_1 c_1+\lambda_2 c_2+\lambda_3 c_3 \qquad (1)$$

If interpolation is not possible, the nearest neighbor method is used. The remaining missing values are filled by the median per column [6].

2.4. Calculating similarity between time series.

The similarity metric used in this study is Euclidian distance, defined as:

$$D(x,y)=\sqrt{\sum_{t=1}^{T}(x_t-y_t)^2} \qquad (2)$$

[7].

2.5. Clustering.

K-Means is an iterative clustering algorithm that partitions observations into k clusters by minimizing the intra-cluster

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

variance in Euclidean space. K-Means uses computed centroids that represent the average of all points in the corresponding cluster. The algorithm is based on minimizing the following objective function:

$$J = \sum_{i=1}^{k} \sum_{x \in C_i} \|x - \mu_i\|^2, \quad (3)$$

where Ci is the set of observations in cluster i, μ_i is the centroid of the cluster, $\|x-\mu i\|^2$ is the squared Euclidean distance between an observation and the centroid. The procedure begins with an initialization of the k centroids, after which two main steps are repeated:

- *Assignment step:* each observation is associated with the closest centroid according to the Euclidean distance.
- *Update step:* centroids are recalculated as the arithmetic mean of all points in the corresponding cluster [8].

2.6. Determining the optimal number of clusters

To select the optimal number of clusters k, the Silhouette metric is used. It evaluates the quality of clustering by the ratio between the intra-cluster and inter-cluster distances:

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{max(a(i), b(i))}, \quad (4)$$

Error! Bookmark not defined.

where a(i) is mean distance to the cluster and b(i) is mean distance to the nearest cluster. The procedure involves testing values of k in the range from 2 to 5 and calculating the Silhouette coefficient for each value; selecting k at which the coefficient is maximum. The advantage of Silhouette coefficient is that it accesses the quality of clustering without the need for predefined labels, taking into account the compactness of clusters and their separability, which allows for an objective assessment of the results [9].

2.7. Visualization and interpretation

The results are visualized using the Multidimensional Scaling (MDS) method, which projects the day profiles into a three-dimensional space while preserving the relative distances between objects. The method provides an intuitive representation of clusters, facilitates the detection of structures and outliers, and aids to the interpretation of results [10].

RESULTS

The aim of current study is to identify typical traffic patterns by applying K-Means clustering on daily traffic profiles for different days and directions.

3.1. Silhouette score.

Figures 2 and 3 show the Silhouette score for the number of vehicles and speed towards the Center. As can be seen from the graphs, the optimal number of clusters in both cases is 2.

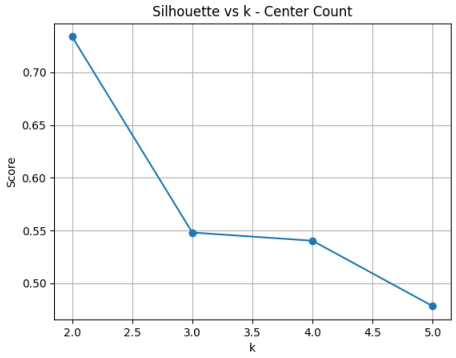
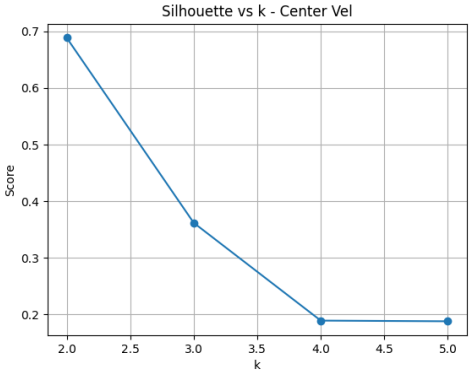


***Fig. 2**. Silhouette score for number of vehicles for direction Center.*



Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

***Fig. 3**. Silhouette score for velocity for direction Center.*

Figures 4 and 5 show the Silhouette score for the number of vehicles and the speed towards the Ring Road. As can be seen from the graph, the optimal number of clusters is 3 for the number of vehicles and 2 for the velocity.

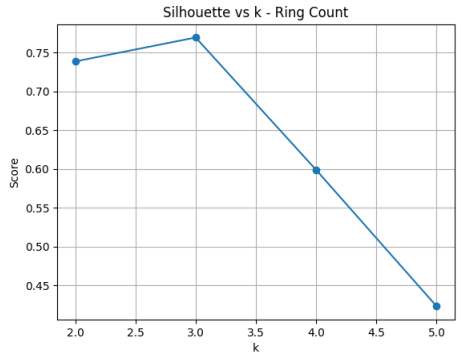


***Fig. 4**. Silhouette score for number of vehicles for direction Ring Road.*

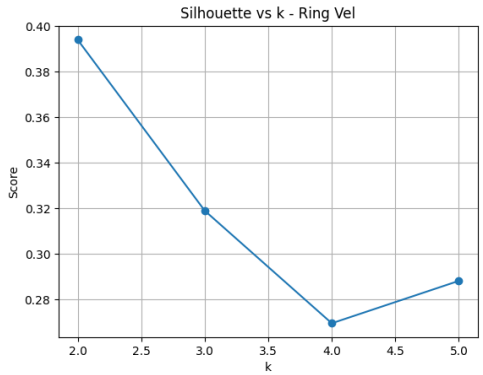


***Fig. 5**. Silhouette score for velocity for direction Ring Road.*

Based on the graphics can be concluded that traffic in direction Center is more homogeneous, while in direction Ring Road - more diverse.

3.2. 3D graphics of MDS.

K-Means clustering results of Euclidian distance are visualized using 3D MDS projection of daily traffic time series. Each point represents a daily observation, colored according to cluster membership. In the plots, individual clusters stand out clearly, with each color representing a different cluster.

Figure 6 shows 3D MDS graphic for number of vehicle for direction Center.

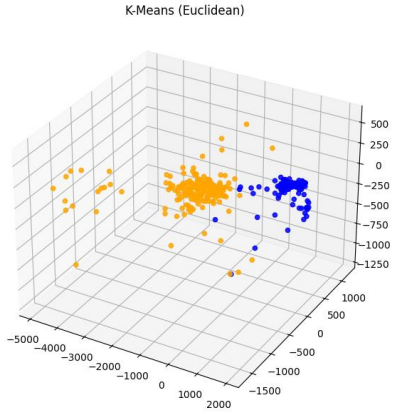
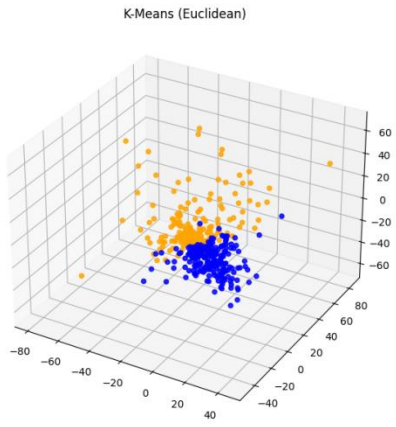


***Fig. 6**. 3D MDS graphic for number of vehicles for direction Center.*

On the graph of number of vehicles for direction center the two clusters are clearly separated. C0 (blue) is smaller and probably covers days with more stable profiles throughout the day, while C1 (orange) is larger and represents days with higher variability in the number of cars.

Figure 5 shows 3D MDS cluster profiles of the average speed for the direction center. Each profile reflects the average speed dynamics within a 24-hour cycle for a group of days with similar behavior.



Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

***Fig.** 7. 3D MDS graphic velocity for direction Center*

In the velocity plot for the Center direction of k-means, the data appears to be distributed in a compact cluster with evenly spaced points around it. K-means splits this cluster into 2 through the middle.

Figure 8 shows 3D MDS graphic of number of vehicles in direction Ring Road.

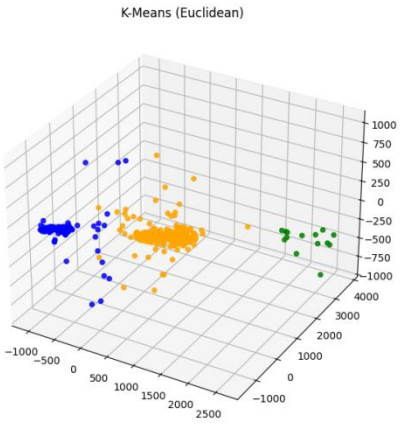


***Fig. 8**. 3D MDS graphic for number of vehicles for direction Ring Road.*

The vehicles count graph for direction Ring Road clearly distinguishes 3 clusters: C0 (blue) – a compact group on the left of the graph. These are probably days with more stable and regular traffic, with less variation in the number of cars during the day. C1 (orange) – more scattered points in the central part of the graph. This indicates days with high variability in the number of cars – for example, peak days or days with accidents/events; C2 (green) – a separate, small cluster on the right. These are anomalous or rare cases, for example, holidays, special events etc.

Figure 9 shows 3D MDS graphic of velocity in direction Ring Road.

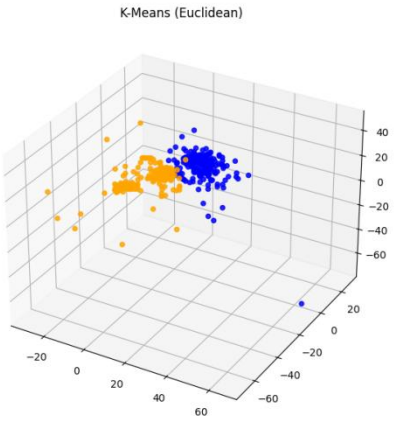


***Fig. 9**. 3D MDS graphic for velocity for direction Ring Road.*

The speed graph of the K-Means algorithm presents 2 equally large clusters, with the orange one being more scattered, likely including holidays and days with incidents, while the blue one is more compact, reflecting days with regular traffic.

CONCLUSIONS

The article presents a method for analyzing daily traffic profiles using a combination of Euclidian distance and K-Means clustering. The method allows detection of typical traffic patterns.

The results obtained from the clustering provide information about the nature of the daily traffic profiles in the studied section - the two lanes of St. Petersburg Blvd. in Plovdiv.

Additionally, experiments with normalization show that it leads to a more compact cluster, at the cost of losing information about the real values. Therefore, an approach without normalization was chosen, which allows for better interpretation of the results in the context of real traffic.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

The results show a difference in the homogeneity of traffic in both directions. In the direction towards the Center, homogeneous traffic is observed, which is confirmed by the number of selected clusters - 2, both for the number of vehicles and for speed. In the direction of the Ring Road, the clusters for the number of vehicles are 3, and the clusters for speed - 2. This indicates greater variations in traffic, probably influenced by factors such as outflow from the city, events or seasonal effects.

MDS visualizations further confirm these observations. Towards the Center, the clusters are clearly demarcated and compact, indicating stability of traffic patterns. Along the Ring Road, the clusters are more dispersed, reflecting higher dynamics and the presence of atypical days.

Despite the results, the study has some limitations. First, the presence of missing data necessitates the use of interpolation, which may introduce inaccuracies. Furthermore, the analysis is based on data from a single location, which limits the possibility of direct generalization to other urban environments.

Future work will focus on comparing the results obtained with results from other conventional clustering methods, such as K-Means, Hierarchical Clustering, and Density based clustering. Another possibility for future studies is to enrich the studied data with meteorological data.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was funded by the European Regional Development Fund within the OP "Research, Innovation and Digitalization Programme for Intelligent Transformation 2021-2027", Project No BG16RFPR002-1.014-0005 Center of competence "Smart mechatronics, eco- and energy-saving systems and technologies".

REFERENCES

[1]Zhang J, Wang FY, Wang K, Lin WH, Xu X, Chen C. Data-Driven Intelligent Transportation Systems: A Survey, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2011, 12, no. 4, pp. 1624-1639, DOI: 10.1109/TITS.2011.2158001.

[2]Chowdhury M, Dey K, Apon A. Data analytics for intelligent transportation systems. 2nd ed.; Elsevier. 2024.

[3]Attari MYN, Ejlaly B, Heidarpour H, Ala A. Application of data mining techniques for the investigation of factors affecting transportation enterprises. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23, 7, pp. 9184-9199, DOI: 10.1109/TITS.2021.3092348.

[4]Cebecauer M, Jenelius E, Gundlegård D, Burghout W. Revealing Representative Day-types in Transport Networks Using Traffic Data Clustering. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2024, 28, 5, pp. 695-718, DOI: 10.1080/15472450.2023.2205020.

[5]Zhou F, Yao J, Yin H. Identifying the Passenger Transport Corridors in an Urban Rail Transit Network Based on OD Clustering. Sustainability, 2025, 17, 9127. DOI: 10.3390/su17209127

[6]Interpolation in 2D. Available online: https://users.tricity.wsu.edu/~hudson/Teaching/EE221/Text/16%20Interpolation%20in%202D.pdf (accessed on 13.05.2026).

[7]Euclidian distance. Available online: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/euclidean-distance (accessed on 13.05.2026).

[8]Sinaga KP, Yang MS. Unsupervised K-Means Clustering Algorithm, IEEE Access, 2020, 8, pp. 80716-80727, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2988796.

[9]What is Silhouette Score. Available online: https://www.geeksforgeeks.org/machine-learning/what-is-silhouette-score/ (accessed on 13.05.2026).

[10]Davison ML, Sireci SG. Multidimensional Scaling, Handbook of Applied Multivariate Statistics and Mathematical Modeling, Academic Press, 2000, p.p. 323-352, DOI: https://doi.org/10.1016/B978-012691360-6/50013-6.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

„СРАВНИТЕЛЕН ДИФРАКЦИОНЕН АНАЛИЗ НА ОЛОВЕН И БЕЗОЛОВЕН МЕСИНГ: ВЛИЯНИЕ НА ТЕРМИЧНАТА ОБРАБОТКА ВЪРХУ ФАЗОВАТА СТАБИЛНОСТ“

COMPARATIVE XRD ANALYSIS OF LEADED AND LEAD-FREE BRASSES: THE IMPACT OF THERMAL TREATMENT ON PHASE STABILITY

Vladimir Petrov Dunchev

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

Abstract

This study investigates the crystallographic differences between traditional leaded brass and modern lead-free alternatives. Using X-ray Diffraction (XRD) analysis, the phase composition of as-received leaded brass, as-received lead-free brass, and tempered lead-free brass were compared. Results indicate that while leaded brass shows discrete Pb inclusions, lead-free variants rely on complex Cu-Zn phase matrices. Tempering of the lead-free alloy at 500°C followed by oven cooling induced a complete transition from a duplex α+β' state to a highly crystalline, single-phase α structure. This transformation was marked by a significant increase in peak intensity and a reduction in Full Width at Half Maximum (FWHM), suggesting improved structural homogeneity and stress relief.

Keywords: leaded brass, lead-free brass, x-ray diffraction analysis.

1. INTRODUCTION

The global metallurgical industry is currently undergoing a significant transition driven by environmental mandates, such as the REACH regulation and the Safe Drinking Water Act, which restrict the use of lead in brass alloys. Traditionally, leaded brass like $CuZn_{39}Pb_3$ has been the industrial standard due to its excellent machinability [1-3]; lead acts as an internal lubricant and chip-breaker because it is nearly insoluble in the *Cu - Zn* matrix, precipitating as discrete globules at the grain boundaries. However, the toxicity of lead necessitates the development of lead-free alternatives, which must achieve comparable mechanical performance through precise phase control [4-6].

The microstructure of lead-free brass is highly sensitive to its thermal history and alloying strategy [6-9]. In the as-received state, these alloys often harbor significant micro-strains and a heterogeneous distribution of the *β'* phase, which can lead to stress corrosion cracking (SCC) or reduced ductility. The thermodynamic stability of the *α* Face-Centered Cubic (FCC) and *β'* Body-Centered Cubic (BCC) phases is governed by the zinc equivalent and cooling rates. This study explores the thermal homogenization of lead-free brass, hypothesizing that tempering at a critical temperature of *500°C* facilitates

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

the migration of zinc atoms into the α matrix, effectively dissolving the brittle secondary phases. Furthermore, the evolution of the diffraction profile serves as a direct probe into the recovery mechanisms and grain coarsening kinetics during slow cooling. By comparing these results to a leaded benchmark, we provide a crystallographic basis for optimizing the heat treatment parameters required for industrial lead-free substitution.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Sample Preparation

Three distinct specimens were prepared for comparative analysis:

1. Leaded Brass: A standard commercial grade used as a benchmark for phase identification;

2. Lead-Free Brass (As Received): An eco-friendly alloy in its initial post-processing state;

3. Lead-Free Brass (Tempered): The as-received alloy subjected to a tempering heat treatment at *500°C*. The sample was held at peak temperature for a predetermined soaking time and subsequently subjected to oven cooling. This slow cooling rate was selected to ensure near-equilibrium phase transformation and to minimize residual thermal stresses.

2.2 X-ray Diffraction (XRD) Characterization

Crystallographic characterization was performed using a Bruker D8 Advance diffractometer. The instrument was operated in a coupled *2θ/θ* geometry (Bragg-Brentano configuration). To ensure high-resolution peak separation, Chromium radiation (*CrKα*) was utilized with a characteristic wavelength of $\lambda=2.28970\text{Å}$. This choice of radiation is particularly effective for copper-based alloys to minimize fluorescence and provide a broader *2θ* spread for the high-angle reflections. Data collection was performed over a wide angular range of *60°* to *160°* 2θ with a step size of *0.02°*.

2.3 Data Processing and Phase Analysis

Qualitative phase identification and peak indexing were conducted using the *Bruker Diffrac.EVA* software suite. The experimental patterns were compared against the *ICDD PDF-2* (International Centre for Diffraction Data) database. The software was utilized to:

- Perform background subtraction and *Kα2* stripping;

- Identify the characteristic Miller indices (*hkl*) for the *α* (*FCC*) and *β'* (*BCC*) phases;

- Detect trace signatures of elemental Lead (*Pb*) in the benchmark sample;

- Analyze the Full Width at Half Maximum (*FWHM*) and integrated intensities to assess the effects of tempering on crystallinity and grain coarsening.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Phase Identification and Indexing

The diffractograms processed via **Diffrac.EVA** confirmed the following phase distributions:

- **Leaded Brass:** Exhibited a complex pattern including *α-Cu* (*111*) at *≈64°*, *β'-CuZn* (*110*) at*≈66°*, and distinct *Pb* reflections at *82°*, *100°*, and *107°* (*fig. 1*).

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

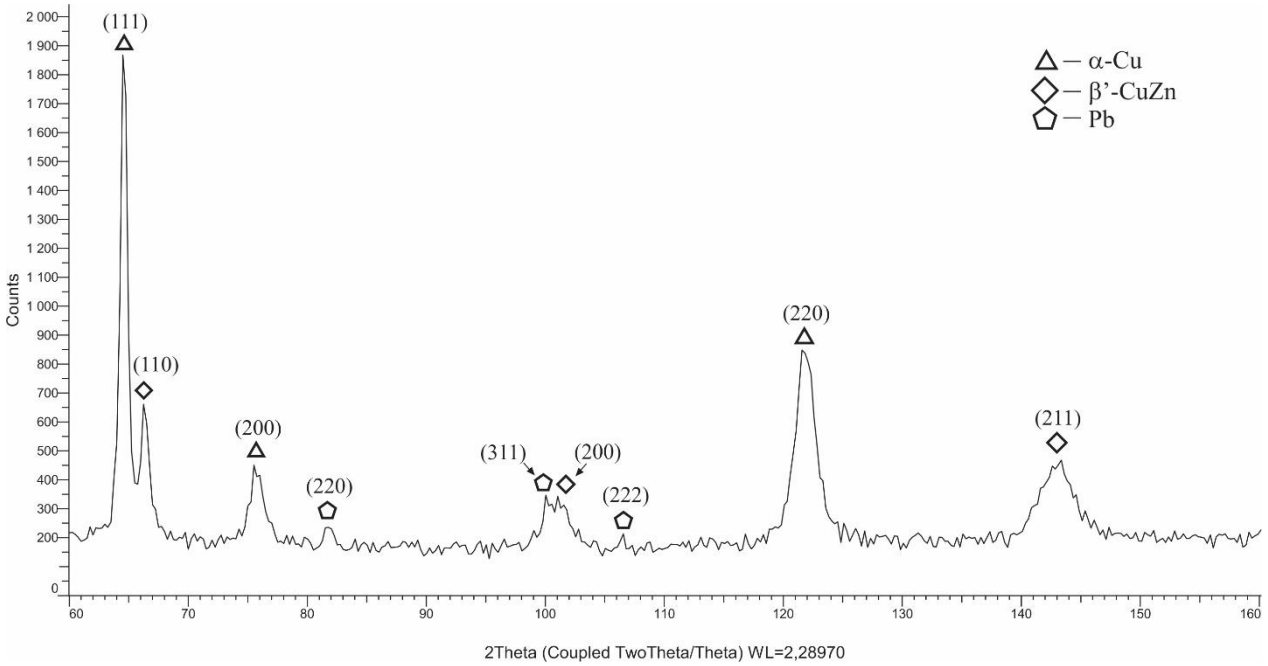


Fig. 1 *X-ray diffractogram of leaded brass*

- **Lead-Free (As-Received):** Showed a similar $\alpha+\beta$' duplex structure, but with a notable absence of *Pb* peaks, confirming the alloy's purity (*Fig. 2*).

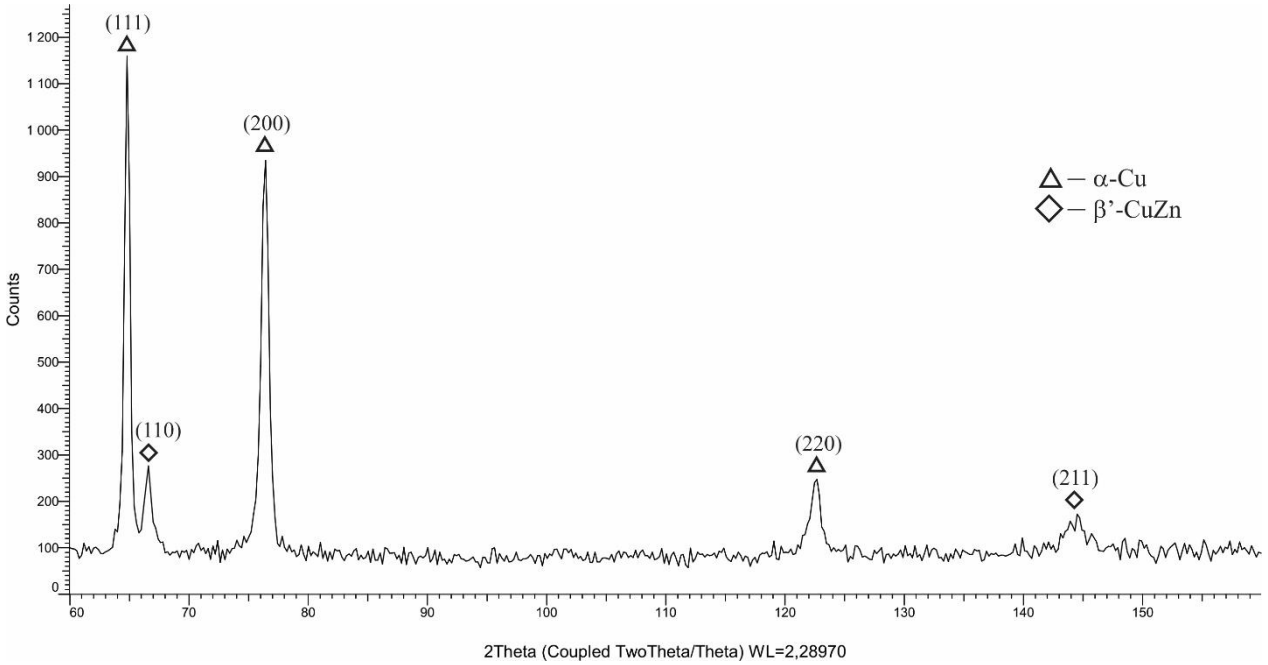


Fig. 2 *X-ray diffractogram of lead-free brass (as received)*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

- **Lead-Free (Tempered):** The most significant finding was the total dissolution of the *β*’ phase. The pattern indexed purely to the α-*Cu* phase (*Fig. 3*).

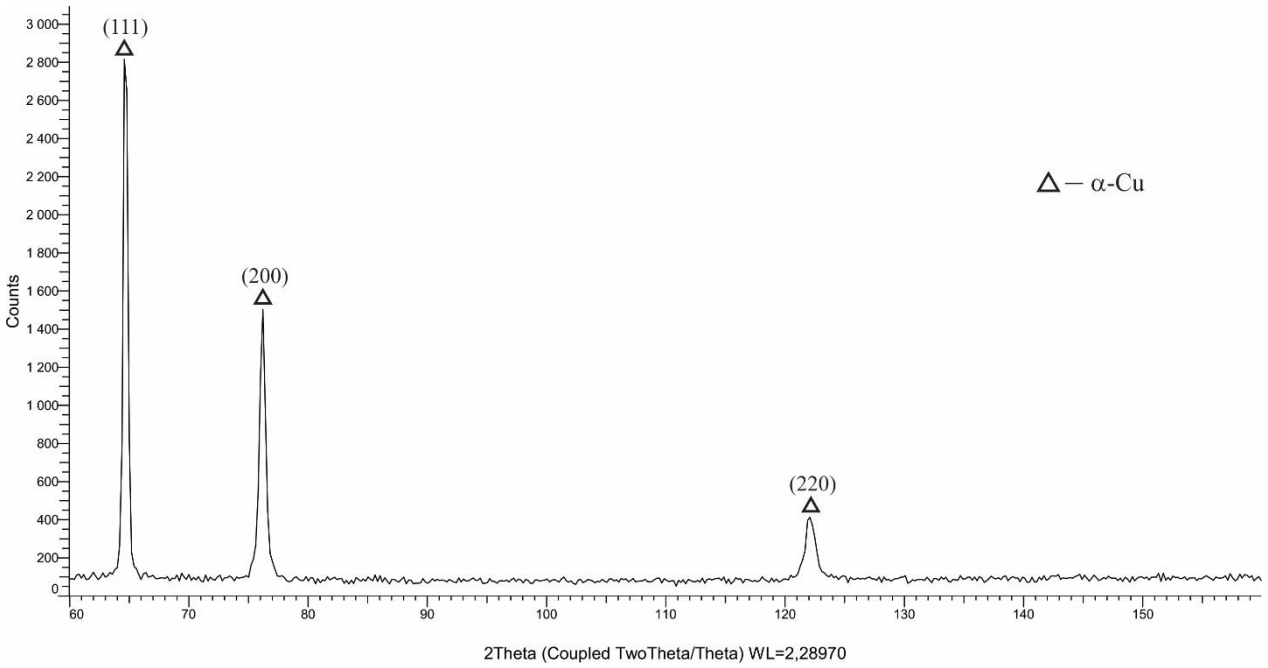


Fig. 3 *X-ray diffractogram of lead-free brass (tempered)*

3.2 Impact of Oven Cooling from 500°C

The *Diffrac.EVA* analysis highlighted a dramatic increase in the (*111*) *α* peak intensity, rising to approximately *2900* counts, compared to the *~1200* counts of the as-received sample. This high intensity, coupled with significantly narrower peak profiles, serves as a direct indicator of:

1. **Grain Growth:** The slow oven cooling from *500°C* allowed for substantial grain coarsening;

2. **Lattice Perfection:** The reduction in FWHM confirms that tempering effectively removed the lattice defects and micro-strains typically introduced during the as-received manufacturing stage;

3. **Homogenization:** The resulting single-phase *α* structure suggests that *500°C* is above the solvus temperature for this specific lead-free chemistry, and the slow cooling allowed the zinc to remain in solid solution within the copper lattice rather than precipitating as *β*’.

4. CONCLUSION

The comparative *XRD* study successfully mapped the transition of lead-free brass from a strained duplex structure to a highly crystalline single-phase system. Using the Bruker D8 Advance and *Diffrac.EVA*, we demonstrated that *500°C* tempering followed by oven cooling eliminates the secondary β’ phase and promotes structural homogenization. The resulting lead-free alloy exhibits superior crystalline perfection and larger grain sizes compared to its as-received counterpart, making it a robust candidate for replacing traditional leaded brasses in industrial applications.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was funded by the European Regional Development Fund within the OP "Research, Innovation and Digitalization Programme for Intelligent Transformation 2021-2027", Project No BG16RFPR002-1.014-0005 Center of competence "Smart mechatronics, eco- and energy-saving systems and technologies".

REFERENCES

[1] Jasper, S.; Subash, R.; Muthuneelakandan, K.; Vijayakumar, D.; Jhansi Ida, S. The Mechanical Properties of Brass Alloys: A Review. Eng. Proc. 2025, 93, 11.

[2] Imai, H.; Kosaka, Y.; Kojima, A.; Li, S.; Kondoh, K.; Umeda, J.; Atsumi, H. Characteristics and machinability of lead-free P/M Cu60–Zn40 brass alloys dispersed with graphite. Powder Technol. 2010, 198, 417–421.

[3] Stoddart, C.T.H.; Lea, C.; Dench, W.A.; Green, P.; Pettit, H.R. Relationship between lead content of Cu-40Zn, machinability, and swarf surface composition determined by auger electron spectroscopy. Met. Technol. 1979, 6, 176–184.

[4] Stavroulakis, P.; Toulfatzis, A.I.; Pantazopoulos, G.A.; Paipetis, A.S. Machinable Leaded and Eco-Friendly Brass Alloys for High Performance Manufacturing Processes: A Critical Review. Metals 2022, 12, 246. https://doi.org/10.3390/met12020246

[5] Brans, K.; Kind, S.; Meurer, M.; Bergs, T. Influence of the Material Production Route on the Material Properties and the Machinability of the Lead-Free Copper-Zinc-Alloy CuZn40 (CW509L). Metals 2024, 14, 747. https://doi.org/10.3390/met14070747

[6] Toulfatzis, A.I.; Pantazopoulos, G.A.; David, C.N.; Sagris, D.S.; Paipetis, A.S. Machinability of eco-friendly lead-free brass alloys: Cutting-force and surface-roughness optimization. Metals 2018, 8, 250.

[7] Toulfatzis, A.; Pantazopoulos, G.; David, C.; Sagris, S.; Paipetis, A. Final heat treatment as a possible solution for the improvement of machinability of Pb-free brass alloys. Metals 2018, 8, 575.

[8] Toulfatzis, A.I.; Pantazopoulos, G.A.; Paipetis, A.S. Microstructure and properties of lead-free brasses using post-processing heat treatment cycles. Mater. Sci. Technol. 2016, 32, 1771–1781.

[9] Chen, K.-J. Novel Application Research on Critical High-Temperature Deformation of Low-Lead Brass Alloy. Metals 2020, 10, 722. https://doi.org/10.3390/met10060722

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

„СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА ЕВОЛЮЦИЯТА НА МИКРОСТРУКТУРАТА И АНАЛИЗ НА ЕКОЛОГОСЪОБРАЗНОСТТА ПРИ РАБОТА С МЕСИНГОВИ СПЛАВИ С И БЕЗ СЪДЪРЖАНИЕ НА ОЛОВО“

COMPARATIVE MICROSTRUCTURAL EVOLUTION AND SUSTAINABILITY ANALYSIS OF LEADED VS. LEAD-FREE BRASS ALLOYS

Vladimir Petrov Dunchev

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

Abstract

The industrial transition from leaded to lead-free brass is driven by global environmental regulations such as RoHS and REACH. This study utilizes Scanning Electron Microscopy (SEM) to characterize the microstructural differences between traditional $CuZn_{39}Pb_3$ and a sustainable lead-free alternative. Analysis focuses on the distribution of lead globules in traditional brass and the phase transformation of lead-free brass from a dual-phase as-received state to a single-phase α structure after tempering at 500°C. The results correlate these microstructural states to industrial workability and environmental impact.

Keywords: dual-phase brass, lead-free brass, SEM, microstructure, sustainability, workability.

1. INTRODUCTION

The copper-zinc alloy system, commonly known as brass, has served as a cornerstone of industrial manufacturing for centuries. Traditionally, the most widely utilized grade is $CuZn_{39}Pb_3$, a free-cutting brass where lead (Pb) is added specifically to enhance machinability [1-3]. From a metallurgical perspective, lead is virtually insoluble in the copper-zinc matrix, resulting in its precipitation as discrete, microscopic globules distributed throughout the microstructure. These globules serve two critical functions: they act as a solid lubricant at the tool-chip interface and create localized stress concentrations that facilitate chip breaking. This allows for high-speed automated machining with minimal tool wear and superior surface finishes [3-6].

Despite these technical advantages, the presence of lead has become a significant liability due to its high toxicity and environmental persistence. In recent years, global regulatory frameworks, most notably the EU’s REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) and RoHS (Restriction of Hazardous Substances) directives - have imposed strict limits on lead content in consumer goods, plumbing fixtures, and electronics. These mandates have created an urgent industrial

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

demand for lead-free or low-lead alternatives that can match the mechanical reliability of traditional alloys without the associated health risks [7].

Transitioning to lead-free brass, however, is not a simple elemental substitution. Without the internal lubrication of lead, these alloys often exhibit different deformation mechanisms, higher cutting forces, and gummy machining behavior. Consequently, the industry has turned toward microstructural engineering specifically through phase control and heat treatment to optimize these new materials [8-9].

This study explores the microstructural evolution of a lead-free brass compared to the traditional leaded benchmark. By employing Scanning Electron Microscopy (SEM), we investigate how the as-received dual-phase (α+β’) structure of lead-free brass can be heat threated via a 500° C tempering process to achieve a homogenized single-phase (α) state. This analysis aims to correlate these microstructural shifts with practical workability and the broader goals of sustainable, green metallurgy.

2. EXPERIMENTAL METHODOLOGY

2.1. Material Selection and Preparation

Two distinct brass alloys were utilized in this comparative study to evaluate the effects of lead content and thermal processing on microstructural evolution:

Leaded Brass (Benchmark): Commercial grade CuZn39Pb3 was examined in its as-received state to establish a baseline for lead distribution.

Lead-Free Brass: A sustainable alternative alloy was investigated in two distinct metallurgical conditions to observe phase transformations:

As-received: Characterized by a dual-phase (α+β’) structure resulting from industrial cold-working;

Tempered: Samples were subjected to a precision heat treatment in an electric resistance oven at 500°C, followed by controlled slow oven cooling to promote recrystallization and phase homogenization.

2.2. Metallographic Preparation

To ensure high-quality SEM imaging, samples were sectioned and subjected to a standard metallographic grinding and polishing sequence. This included:

Mechanical grinding using SiC abrasive papers from 240 to 1200 grit;

Fine polishing with diamond suspension (3 µm and 1 µm) to achieve a mirror-like surface finish;

Chemical Etching: Samples were etched to reveal grain boundaries and secondary phases by Ferric Chloride.

2.3. Scanning Electron Microscopy (SEM)

Microstructural characterization was performed using a Zeiss Evo 10 SEM. To optimize image quality and analytical depth, the following parameters and detectors were employed:

Acceleration Voltage: Maintained at 20.00 kV to ensure sufficient penetration and signal for heavy-element detection (Lead, Z=82);

Secondary Electron (SE) Imaging: Used primarily to analyse surface morphology, grain topography, and the presence of slip bands in the cold-worked samples;

Backscattered Electron (BSE) Imaging: Utilized for high-contrast compositional analysis. This mode was critical for identifying lead globules, which appear as high-intensity (bright) features due to the sensitivity of BSE to atomic number (Z) contrast.

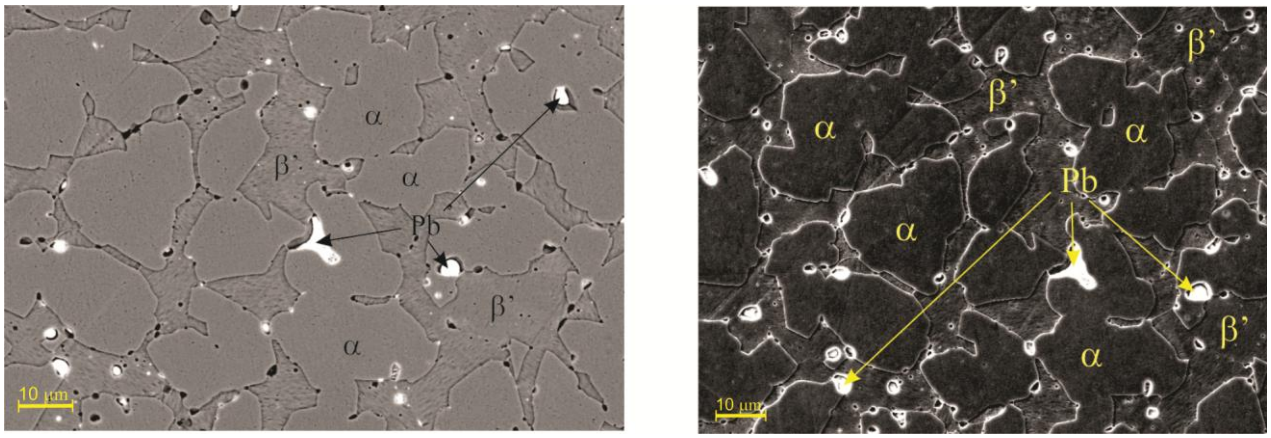
3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Microstructure of Leaded Brass

In the BSE image (Fig. 1a), the leaded brass exhibits a heterogeneous structure. Due to the high atomic number of lead (Z=82),

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

lead particles appear as bright, high-contrast white globules. These are distributed primarily along grain boundaries. The corresponding SE image (Fig. 1b) confirms these sites, though without the compositional clarity of BSE, showing them as distinct phase-boundary features.



a. b.

Fig. 1 *SEM images of Leaded brass $CuZn_{37}Pb_3$*

3.2. Lead-Free Brass: As-Received State

The as-received lead-free brass (Fig. 2) reveals a dual-phase microstructure. Elongated grains and high-density slip bands are visible, indicating significant internal strain from cold-working processes. This state offers high mechanical strength but lacks the internal lubrication provided by lead, potentially leading to increased friction and tool wear during machining.

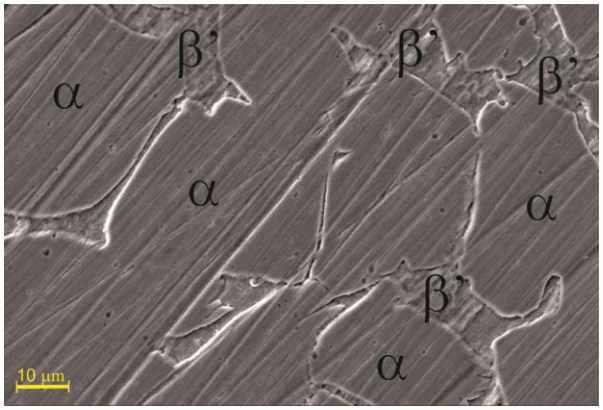


Fig. 2 *SEM images of as-received lead-free brass*

3.3. Lead-Free Brass: Tempered State (500°C)

Upon tempering at 500°C with slow oven cooling (Fig. 3), the alloy undergoes a complete phase transformation.

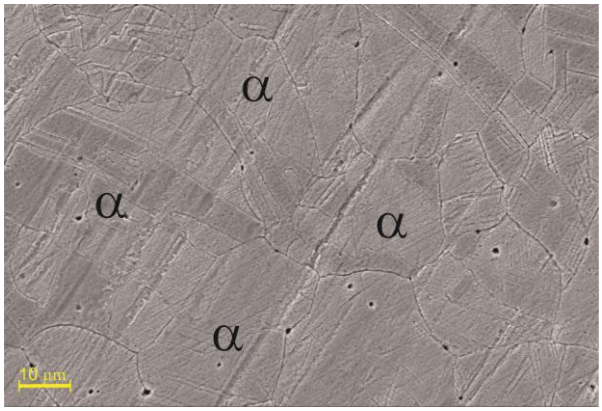


Fig. 3 *SEM images of tempering at 500°C lead-free brass*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

The dual-phase morphology is replaced by a homogenized, equiaxed single-phase α structure. A high frequency of annealing

twins straight parallel boundaries within the grains indicates a successfully recrystallized, low-energy state.

4. WORKABILITY AND SUSTAINABILITY

Table 1 ***Workability and Sustainability***

Feature	Leaded Brass	Lead-Free (As-Rec)	Lead-Free (Tempered)
Machinability	Excellent (Short chips)	Moderate (Stringy chips)	Low (Gummy behavior)
Formability	Low	Moderate	Excellent
Environmental	High Toxicity / Restricted	Green / Compliant	Green / Compliant

Sustainability Analysis: The lead-free alloy represents a significant advancement in Green Metallurgy. While leaded brass poses leaching risks at end-of-life, the lead-free alternative is fully compliant with modern environmental directives. Furthermore, the tempered single-phase state, while requiring an energy-intensive heat treatment, provides the ductility necessary for complex cold-forming, reducing the scrap rate and improving the overall lifecycle efficiency of the material (table 1).

5. CONCLUSION

The transition to lead-free brass requires a fundamental shift in metallurgical strategy. This study demonstrates that while lead provides effortless machinability through phase separation, lead-free alloys can be precisely tuned through thermal processing. Tempering at 500°C effectively transforms the alloy into a highly ductile α structure, suitable for sustainable manufacturing processes where formability and environmental compliance are prioritized over traditional high-speed machining.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was funded by the European Regional Development Fund within the OP "Research, Innovation and Digitalization Programme for Intelligent Transformation 2021-2027", Project No BG16RFPR002-1.014-0005 Center of competence "Smart mechatronics, eco- and energy-saving systems and technologies".

REFERENCES

[1] Jasper, S.; Subash, R.; Muthuneelakandan, K.; Vijayakumar, D.; Jhansi Ida, S. The Mechanical Properties of Brass Alloys: A Review. Eng. Proc. 2025, 93, 11.

[2] Imai, H.; Kosaka, Y.; Kojima, A.; Li, S.; Kondoh, K.; Umeda, J.; Atsumi, H. Characteristics and machinability of lead-free P/M Cu60–Zn40 brass alloys dispersed with graphite. Powder Technol. 2010, 198, 417–421.

[3] Stoddart, C.T.H.; Lea, C.; Dench, W.A.; Green, P.; Pettit, H.R. Relationship between lead content of Cu-40Zn, machinability, and swarf surface composition determined by auger electron spectroscopy. Met. Technol. 1979, 6, 176–184.

[4] Pantazopoulos, G. Leaded brass rods C 38500 for automatic machining operations: A technical report. J. Mater. Eng. Perform. 2002, 11, 402–407.

[5] Johansson, J.; Alm, P.; M'Saoubi, R.; Malmberg, P.; Ståhl, J.-E.; Bushlya, V. On the Function of Lead (Pb) in Machining Brass Alloys. Res. Sq. 2022, Preprint.

[6] Wolfenden, A.; Wright, P.K. Role of lead in free-machining brass. Met. Technol. 1979, 6, 297–302.

[7] Toulfatzis, A.I.; Pantazopoulos, G.A.; David, C.N.; Sagris, D.S.; Paipetis, A.S. Machinability of eco-friendly lead-free brass alloys: Cutting-force and surface-roughness optimization. Metals 2018, 8, 250.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

[8] Toulfatzis, A.; Pantazopoulos, G.; David, C.; Sagris, S.; Paipetis, A. Final heat treatment as a possible solution for the improvement of machinability of Pb-free brass alloys. Metals 2018, 8, 575.

[9] Toulfatzis, A.I.; Pantazopoulos, G.A.; Paipetis, A.S. Microstructure and properties of lead-free brasses using post-processing heat treatment cycles. Mater. Sci. Technol. 2016, 32, 1771–1781.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

СЪХРАНЯВАНЕ НА ВИДЕО ДАННИ С РАЗШИРЕНА ИНФОРМАЦИЯ ЗА МЕТЕОРОЛОГИЧНИ ЯВЛЕНИЯ

STORING VIDEO DATA WITH EXTENDED INFORMATION ABOUT METEOROLOGICAL PHENOMENA

Ivaylo Atanasov
ivo_atan@tu-plovdiv.bg,

Petya Pavlova
p_pavlova@tu-plovdiv.bg

Dobrinka Petrova
dpetrova@tu-plovdiv.bg

Boryana Pachedjieva
pachedjieva@ tu-plovdiv.bg

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

Abstract

This article describes a stage in a project to create a real-time system for extracting, evaluating and categorizing video recordings with atmospheric objects according to meteorological phenomena. In order to detect specific meteorological conditions through atmospheric objects present in video recordings, it is necessary to know the correspondence between them. The problem in processing parameters describing objects characteristic of the phenomenon is the large amount of observations subject to analysis. The development is aimed at servicing a large volume of information, and this material provides the initial steps in building the necessary database. A model for building the database is proposed, including both access to records and access to calculated parameters.

Keywords: video data, database, big data managing

ВЪВЕДЕНИЕ

Публични бази данни се създават с цел предоставяне на информация за обекти, достъпни навсякъде [1-5]. Поради съществуващите различни инструменти за заснемане с разнообразни възможности и типове режими на работа, при натрупване на изображения от реални обекти тяхната регистрация с осигуряване на еднаквост в параметрите е проблем. Освен това, с развитието на компютрите, технологиите, използващи компютърно зрение, все по-често навлизат в сложни автоматизирани системи. Много от обектите, подложени на проследяване в такива системи, имат определени граници и могат да бъдат идентифицирани с подходящи алгоритми [6-8], но това не е така при стохастични обекти с динамично променяща се форма и граници, каквито характеризират метеорологичните явления. Те включват и атмосферни фактори, водещи до бърза промяна във видимостта на сцената. Затова, важен етап в обработката е откриването на конкретния тип смущаващ фактор в заснетите изображения или видео записи: наличие на мъгла, смог, снеговалеж, дъжд, градушка, поява на ярко осветен обект в зрителното поле на камерата (например слънце, улична лампа или фарове на кола), заснемане на видео в остро отражение [9]. Поради големия брой реализации, натрупването на данни, които позволяват откриването на някое от гореспоменатите явления в дадено изображение/кадър, изисква огромен брой наблюдения и сложен анализ на извлечените параметри. Целта на нашата работа е да предоставим база данни, разширена с локализи-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

рани обекти, фиксирани метеорологични явления и пресметнати параметри, снабдена с подходяща организация на обслужването, която да улесни процеса на анализ на записите.

НАЛИЧНИ БАЗИ ДАННИ

Понастоящем в интернет пространството се срещат бази данни с класификация, повечето от които са по-скоро набор от изображения, разпределени в директории за съответното явление – ясно небе, облаци, дъжд, мъгла и др. Те са реферирани като набори от данни (dataset), а не бази данни. Таблица 1 обобщава някои от тях.

Таблица 1. *Списък известни набори данни*

URL	данни за природни феномени	Вид достъп
данни [1]	Роса, мъгла, слана, градушка, светкавици, дъжд, дъга, пясъчна буря, сняг	свободен
данни [2]	Слънчево, облаци, дъжд, мъгла, сняг	ограничен
данни [3]	Градушка, слана, пясъчна буря	ограничен
данни [4]	Слънчево, облаци, дъжд, мъгла, изгрев, сняг	свободен
данни [5]	Ясно, облаци, дъжд, изгрев	свободен

Обща характеристика на описаните набори от данни е, че те са просто визуално класифицирани изображения – всеки от тях няма техническите характеристики, които го свързват с конкретното явление, което описва. Например, ако трябва да се намерят всчки изображения с облачност и сняг трябва да се претърси ръчно цялото множество от данни. Няма възможност чрез подходящ интерфейс да се зададе какво се търси и резултатът да са намерените изображения. Именно този сериозен недостатък на текущите бази се цели да бъде преодолян.

В лабораторията „Обработка на визуална информация в интелигентните транспортни системи“ към центъра за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“ ние съставяме набор от видеозаписи за споменатите явления, направени във външна среда.

За сега са използвани общо пет устройства:

- Камера на телефон A51 Samsung
- Камера на телефон A53 Samsung
- Фотоапарат Canon SX270 HS
- Камера за автомобил Navitel_R250
- Камера на телефон A71 Samsung

Локациите на запис са шест:
София, Пловдив, Асеновград, Несебър, Огняново, Смолянски бани.
Записите са единични и серии с продължителност от 4s до 16h.

В нашите записи всеки кадър се обработва, за да се извлекат стойности за различни параметри в обособени области – пачове, характеризиращи атмосферни обекти, типични за определени метеорологични условия. Стойностите на параметрите се извеждат в текстови файлове, а позиционирането на пачовете се визуализира в jpg изображение на началния кадър. Те са неразделна част от dataset-а.

Информацията е систематизирана в служебно писание, което включва:

- имена на видео записите и производните файлове;
- устройство за конкретен запис;
- локация - обозначена чрез GPS координати;
- посока на заснемане – по посоки на компаса;
- обозначение за начало на записа и фиксирани ограничения на периода и интервала за записи в серия;
- номера на пачове с визуална идентификация на обект при конкретно метеорологично явление.

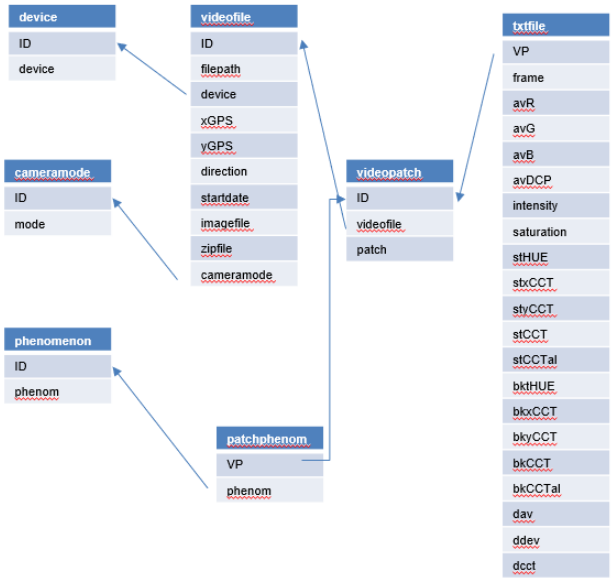
За целите на обслужване на описаната информация е необходимо да се създаде релационна база, която да даде възможност за пълно и удобно манипулиране на данните – запис, извличане, търсене по критерии с удобен интерфейс. Освен за нуждите на конкретния проект към който се разработва – удобна работа с големи масиви от данни,

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

структурата трябва да предлага и публичен достъп към с възможност за детайлност при условията за достъп на потребителите.

МОДЕЛ НА ПРЕДЛОЖЕНАТА БАЗА ДАННИ

На фиг. 1 е моделът на предложената база.



***Фиг. 1**. Релационен модел на базата*

Таблиците в базата са:

devices – списък от физическите устройства, с които е извършено заснемане на видеоматериала

phenomenon – списък с природните явления, обект на проучване и параметризация

cameramode – списък с различните режими на заснемане на камерите

videofile – специфични данни за всеки видеофайл

videofilepatch – връзка между видеофайл и пачовете във файла.

patchphenom – в кой пач какво явление се наблюдава

txtfile – цветовите параметри за всяка двойка <фрейм, пач>

Тези таблици са пряко свързани с работата по анализ на явленията. За работата на базата са необходими и други таблици, тъй като тя трябва да предлага гъвкав достъп, т.е. различни потребители да имат право на различен по време/брой достъп до базата. Те не са представени като част от релационния модел, тъй като имат чисто административна функция.

User – списък с регистрирани потребители.

Usercredentials – за всеки потребител правата на достъп.

Таблици 1-8 описват базата.

Таблица 1. Devices

ПОЛЕ	ТИП	ОПИСАНИЕ
ID	Int	ID на у-во (PK)
Device	string	Име на у-во

Таблица 2. Phenomenon

ПОЛЕ	ТИП	ОПИСАНИЕ
ID	Int	ID (PK)
Phenom	string	Име на явлението

Таблица 3. Cameramode

ПОЛЕ	ТИП	ОПИСАНИЕ
ID	Int	ID (PK)
Mode	string	Име на режима

Таблица 4. Videofile

ПОЛЕ	ТИП	ОПИСАНИЕ
ID	int	ID на у-во (PK)
Filepath	string	Път до файла
Device	string	Име на у-во
xGPS	Float	X координати
yGPS	Float	У координати
Dir	String	Посока (И,З,С,Ю)
Sdate	Date	Дата на записа
Imgfile	String	Път до файл
Zipfile	String	Път до файл
cammod	int	(FK, cameramode)

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Таблица 4. Videofilepatch

ПОЛЕ	ТИП	ОПИСАНИЕ
ID	Int	ID (PK)
Vfile	Int	(FK, videofile)
patch	int	Номер на пач

Таблица 5. Patchphenom

ПОЛЕ	ТИП	ОПИСАНИЕ
VFP	Int	(FK, videofilepatch)
Phenom	Int	(FK, phenomenon)

Таблица 6. Txtfile

ПОЛЕ	ТИП	ОПИСАНИЕ
VFP	Int	ID на у-во (PK)
Frame	int	Име на у-во
avR	Float	Средна ст-ст R
avG	Float	Средна ст-ст G
avB	Float	Средна ст-ст B
avDCP	Float	Средна ст-ст DCP [1]
dvR	Float	Отклонение R
dvG	Float	Отклонение G
dvB	Float	Отклонение B
dvDCP	Float	Отклонение DCP [1]
Intens	Float	(R+G+B)/3
Satur	Float	насищане
stHUE	Int	Цветови тон в HSV
stxCCT	Float	X цветова темп [2]
styCCT	Float	У цветова темп [2]
stCCT	int	M1 цветова темп [2]
stCCTal	Int	M2 цветова темп [2]
bktHUE	Int	Цветови тон в HSV
bkxCCT	Float	X цветова темп [3]
bkyCCT	Float	У цветова темп [3]
bkCCT	Int	M1 цветова темп [3]
bkCCTal	Int	M2 цветова темп [3]
Dav	Float	Разлика [4]
Ddev	Float	Разлика [5]
Dcct	Int	Разлика [6]

[1] DCP – съкращение от Dark Channel Prior (минимална цветообразуваща компонента за пиксел) [10, 11]

[2] DCP – цвят на областта [10, 11]

[3] DCP – цвят на подсветката [10, 11]

[4] DCP – разлика в средната стойност за подсветката, сравнена с този за друга област [10, 11]

[5] DCP – разлика в отклонението за подсветката, сравнена с този за друга област [10, 11]

[6] DCP – разлика в цветовата температура за подсветката, сравнена с този за друга област

Таблица 7. User

ПОЛЕ	ТИП	ОПИСАНИЕ
ID	Int	ID (PK)
User	string	Име на потр.
Password	string	Парола на потр.

Таблица 8. Usercredentials

ПОЛЕ	ТИП	ОПИСАНИЕ
Userid	Int	(FK, user)
From	Date	Начална дата
To	Date	Крайна дата
Nused		Използвани
Nmax		Максимално

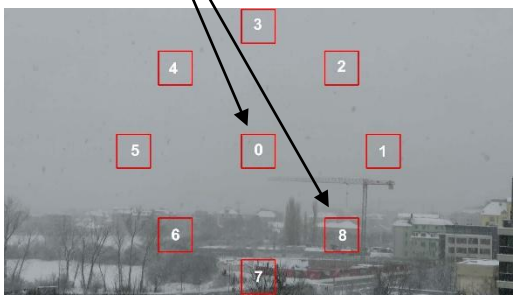
Идеята за достъп до базата включва възможност за разрешен достъп по време (полета From, To) и брой влизания в системата (полета Nused и Nmax).

Като демонстрация на извежданата информация в таблица 9 са показани конкретни крайни данни към потребителя заедно със съответствието на разликите между пачовете в изображение на първи кадър.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Таблица 9. Крайни данни за потребителя

ПОЛЕ	СЪДЪРЖАНИЕ
Device	Canon SX270 HS
Mode	Video frames per second = 30
xGPS	23.2541E
yGPS	42.6841N,
Dir	E (И)
Sdate	1:06:00 PM 1/11/2025
Phenom	мъгла
	сняг
avR	158.7
avG	164.7
avB	165.73
avDCP	158.7
dvR	1.17
dvG	1.17
dvB	1.18
dvDCP	1.17
Intens	163.0448
Satur	0.0424
stHUE	188
stxCCT	0.32964
styCCT	0.33307
stCCT	5630
stCCTal	5627
bktHUE	0
bkxCCT	0.73461
bkyCCT	0.26536
bkCCT	3074
bkCCTal	-1
Dav	30.56
Ddev	16.62
Dcct	-2021
patch	0



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложеният модел на базата данни е стъпка към: 1) по-бързи манипулации с базата (четене/запис/справки); 2) удобен интерфейс за публичен достъп. Тъй като натрупаните данни са от голяма важност за подобни проекти, то удобния, бърз и структуриран достъп до тях може да се използва успешно от различни заинтересовани лица. Релационният модел е предпоставка, че евентуални промени в базовите таблици ще бъдат бързо отразени в по-горния слой на базата – изгледите и тази гъвкавост предполага бърза адаптация към променящи се нужди/изисквания.

Благодарности

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] https://www.kaggle.com/datasets/jehanbhathena/weather-dataset. (accessed May 2026).
[2] https://ieee-dataport.org/documents/five-class-weather-image-dataset. (accessed May 2026).
[3] https://dataverse.harvard.edu/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.7910/DVN/M8JQCR (accessed May 2026).
[4] https://images.cv/dataset-categories/ weather. (accessed 4 May 2026).
[5] https://github.com/PerceptiLabs/Weather-Analysis. (accessed 4 May 2026).
[6] ISO 15076-1:2010, Image technology colour management. Architecture, profile format and data structure — Part 1: Based on ICC.1:2010.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

[7] Gonzalez R., Woods R., Digital Image Processing, 3rd Edition, Prentice Hall, 2007
[8] Pavlova P., Pachedjieva B., “Methodology for numerical assessments of the quality of cloud fields images used in time mutability method”, In: 2020 XXIX International Scientific Conference Electronics (ET). IEEE, 2020. p. 1-5
[9] Mustafa W., Abdul Kadir M., “A review of histogram equalization techniques in image enhancement application”, In: Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2018. p. 012026
[10] https://dsp.stackexchange.com/questions/8949/how-tocalculate-the-color-temperature-tint-of-the-colors-in-animage (accessed May 2026).
[11] http://www.brucelindbloom.com (accessed May 2026).

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

ПРИЛОЖНА МЕТОДИКА ЗА СЪСТАВЯНЕ НА КАРТА НА СЪОТВЕТСТВИЯТА МЕЖДУ ЦИФРОВИ ДАННИ И МЕТЕОРОЛОГИЧНИ АТМОСФЕРНИ ОБЕКТИ

APPLIED METHODOLOGY FOR COMPILING A MAP OF CORRESPONDENCES BETWEEN DIGITAL DATA AND METEOROLOGIC ATMOSPHERIC OBJECTS

Petya Pavlova
p_pavlova@tu-plovdiv.bg

Dobrinka Petrova
dpetrova@tu-plovdiv.bg

Ivaylo Atanasov
ivo_atan@tu-plovdiv.bg,

Boryana Pachedjieva
pachedjieva@ tu-plovdiv.bg

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

Abstract
This work describes a stage in the development of a real-time system for extracting and evaluating parameters from video files of natural atmospheric objects and phenomena. The lack of predictability in the changes of weather conditions and the visibility they provide makes the acquisition of prior knowledge a long and complex process. The aim of the work is to create a data structure in the form of maps that describes the relationships between meteorological conditions and digitally represented atmospheric objects. A preliminary analysis was carried out, through which the three main tasks in compiling the maps were determined: localizing the objects; determining the parameters that characterize them; summarizing the values for each monitored parameter. The selected objects are always observed in the sky and they are clear sky and cloud fields at different weather. In the maps, their numerical characteristics are statistically processed and arranged according to meteorological phenomena. Specialized software has been developed for calculating parameter values and statistical evaluation of the received data. The maps are designed to facilitate the analysis of the identification of atmospheric objects in video records. The development relies on its own data set of registered natural phenomena.

Keywords: identification of meteorological objects; a map of correspondences, weather in images.

ВЪВЕДЕНИЕ

Автономните автоматизирани системи, работещи при външни условия за видеонаблюдение, разчитат на две неща: подходяща калибровка на камерата [1], която елиминира максимално отклоненията в параметрите на регистрираните образи и начални знания, спрямо които се идентифицират обектите, попадащи в зрителното поле. Задължително изискване е обектите да са с видими характеристики, променящи се в предварително определени граници. Извън възможностите за контрол на регистрацията видимостта се определя и от неконтролируем външен фактор - метеорологичните условия. Натрупването на достатъчно предварителни знания за този фактор и техния анализ е продължителен и комплексен процес. Предложените налични решения за оценка на външния фактор се отнасят до откриване на наличие на мъгла в заснети изображения..[2], определяне на дъжд

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

във видео-последователности [3,4]. Тези резултати се ограничават до регистриране на крайното явление без възможност за прогноза и бърза реакция, като една от основните причини е многообразието в метеорологичните условия. В тази разработка предлагаме начин за систематизиране на предварителни знания, които могат да бъдат използвани за анализ на метеорологичните условия и прилагани при следващо обучение на интелигентна автономна система.

ТЕОРЕТИЧНА ПОСТАНОВКА

Съставянето на карта на съответствията е етап от обработката на данните, получавани за обектите и има за цел да улесни анализа на информацията и подготви автоматизирането на процеса по идентификация. Самата карта трябва да свързва визуално оценени атмосферни обекти с тяхното цифрово представяне при заснемане.

Началните знания за всеки атмосферен обект се свързват с различните метеорологични условия: ясно време, частична или плътна облачност, дъжд, снеговалеж, мъгла, градушка, изгрев, залез, ден/нощ.

Някой от явленията са налични само през деня- като градушката и наличието на дъга, както и условия на изгрев и залез на слънцето.

В случай на външно заснемане общият, достъпен елемент е небето. Нужните данни могат да се придобият от обекти, които присъстват или липсват върху него във всеки от записите. Така обектите, които дават начални знания са комбинация от възможни метеорологични условия и видими обекти по небето и са сведени до:

Чисто небе и различни видове облачни полета – бели облаци, сиви облаци, високи облаци.

Първата задача в процеса на съставяне на картата е създаване на **методика за локализация на обектите.**

Ние сме избрали да локализираме области - пачове в рамките на всеки кадър от изследван видео-запис, в която да се открие конкретен обект. Организацията е публикувана в [5,6]

Предимства:

- Създадените области могат да се локализират върху един обект, фиксирайки определени граници;
- Наличието на няколко пача във всеки кадър позволява да бъдат следени промените в условията на регистрация и/или метеорологични условия; Например – промени във видимостта от най-далечен, към най-близко разположен обект в сцената.
- Промените в един и същ пач за различни кадри позволява определяне на скорост на настъпване на промени или скорост на движение на обект.

Особености:

- Всяка камера може да има различна настройка на растера, което означава различно осредняване на пространството от сцената при различни камери;
- За да бъде използван даден пач като подходяща област за параметри на обект е необходимо той да покрива изцяло един единствен обект;

Втората задача изисква **определяне на параметрите**, които могат да бъдат пресметнати като стойност във всеки кадър и охарактеризират обектите.

За да се изберат параметри е необходимо да се потърси връзката между реалното явление и начина на неговото заснемане. Факторите, водещи до промяна в обектите са както метеорологичните условия така и някой допълнителни елементи позиция на слънцето спрямо камерата при заснемане, ориентация на камерата и различните използвани камери.

В изображенията, образите на обектите се формират чрез яркостта и оцветяването на съставящите ги пиксели. Доколкото ме-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

теорологични условия променят цвета на осветяващото лъчение, проследяване на промените би дало информация за условията. Избраните за включване е проследяването параметри са описани по-долу.

Яркостта се възпроизвежда чрез градациите на ахроматичен параметър - *интензитет*. За всеки пач средната стойност от тройката цветообразуващи характеризират нивото на интензитета. Девиацията в параметрите определя хомогенността на тестваната област.

Оцветяването се задава чрез цветност и може да се съпостави на параметри в различни цветови модели.

Наситеност – определя степента на оцветяване на всеки пиксел. В оцветяването се отчитат стойностите на цветообразуващите без общото за тях количество бяло.

Цветови тон – задава ъглова стойност между 0 и 359, съответстваща на тон на цвета пресметнат чрез цветообразуващите за червено, зелено и синьо (R,G,B) получени след осредняване за пикселите формиращи полето (пача).

В базовата система – XYZ, цветът се определя чрез *координатите на цветност* и всяка двойка координати може да се съпостави *корелирана цветова температура – ССТ*. Съгласно дефиницията, цветовата температура съответства на температурата в градус Келвин (К), до която трябва да се нагрее Абсолютно Черно Тяло -АЧТ (изкуствен топлинен излъчвател, копиращ излъчването на слънцето), така че да започне на излъчва лъчение с цвета на лъчението, което тестваме[7].

Доколкото всеки видим цвят има координати в диаграмата на цветност на базовата система XYZ, формално стойност на корелирана цветова температура може да се определи за всичко, без това да е обвързано с реална температура следваща от началната дефиниция.

Прието е корелирана цветова температура да се определя за осветяващия заснемана сцена източник [7]. Както беше отбелязано промяна в стойността ѝ променя цвета на обектите. В едно заснето изображение осветлението присъства като подсветка, която формира референтното бяло. Данни за референтното бяло се получават от минималните компоненти на цветообразуващите компоненти за всеки пиксел дефинирани в предишни публикации като Dark Channel Prior (DCP) [8]. Така за нуждите на изчисляване на ССТ е необходимо да се получат три средни стойности за трите канала, съставени от минималните компоненти за всеки пиксел. В обработката задължително трябва да се отрази и наличието на повече от една минимална компонента. Например: при наличен ахроматичен пиксел (сив), в сумата на всеки от каналите за червено, зелено и синьо се добавя стойност, а към бройката на пикселите във всеки канал се добавя 1.

Трябва да се отбележи, че изборът на някой от параметрите като средна яркост и девиация е направен на базата на това, че те се използват в алгоритмите за подобряване на видимост в изображения [9]. Останалите параметри са избрани на базата на анализ и наблюдения от собствени натрупани записи по време на различни метеорологични условия и възможностите на алгоритмите за обработка на изображения.

Третата задача се отнася до **обобщаване на стойностите за всеки проследяван параметър**. На този етап обработката на резултатите следва да отрази:

1. Стойности на параметрите за (избрани) последователни 100 кадъра за една видео-последователност за един пач, или за един обект в множество записи. Нужните статистически параметри са:

- Граници на изменение, отразени чрез минимална и максимална стойност. *Особеност*: за цветови тон трябва да се отрази фактът, че скалата е кръгова.
- Средна стойност
- Девиация

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

• Мода – най-често повтаряща се стойност в поредицата. Елиминира големите отклонения, които влияят на границите на изменение и средната стойност.

Може да се предположи, че близки стойности на средна и медиана, и ниска девиация насочват към обект стационарен за времето на регистрация, което е важно за нужните начални знания.

2. Стойности на параметрите от точка 1, подредени за всяко използвано устройство за запис и разделени по различните категории обекти и условия при регистрацията.

ПРАКТИЧЕСКА РЕАЛИЗАЦИЯ

За съставяне на картата се използват два специално създадени програмни продукта. Първият обработва видео-файловете, а вторият – текстовите файлове с данни за параметрите.

Програмата, предназначена за извличане на стойности на параметри във видео файлове е разработена чрез OpenCV библиотеката, с използване на езика C++. Обработваните видео-записи са ограничени до форматите, налични в декодера на библиотеката
opencv_videoio_ffmpeg420_64.dll: mp4, avi, mpg, mts, mov. От първия кадър се създава изображение записано в jpg формат, в което са изрисувани позициите и размерите на пачовете с ограничената в тях област (фигура 1). То има за цел да позволи визуален избор на номер на пач, обхващаш изцяло обект.

Фиг. 1 *Локализация на пачовете в jpg файл*

За всеки от пачовете се възпроизвежда текстови файл в който са подредени стойностите на параметрите, пресметнати за всеки кадър. Името на файла съдържа информация за: използваното устройство, година месец ден на записа, номер на записа, номер на пача.

Например:

A53S_20240722_174415_5.txt
у-во_годинаммдд_запис_номер на пач.txt

Извежданите данни включват пресмятане на средни стойности и девиация, интензитет в HSI модел, наситеност и цветови тон в HSV модел [10], координати на цветност в XYZ при референтно равностимулно бяло [11] и корелирана цветова температура по два метода M1 описан в [12] и M2 – описан в [13] и разлика между пресметнати параметри спрямо тези за фиксиран пач номер 8. Последните имат отношение към промяна на видимостта в сцената, поради което не влизат в картата на съответствията. Освен по два метода CCT е пресметната както за обекта и така и за подсветката. Файлът съдържа и допълнителна информация за име на видео-файла, номер на пача, размери на пачовете и брой кадри в секунда при записа.

Всеки използван в картата пач е предварително определен чрез метеорологичните условия и селектиран визуално с наличния в него обект и.

Чрез вторият програмен модул се прави статистическа обработка на стойностите на параметрите. Това включва пресмятане на минимална и максимална стойност, средна стойност и девиация, и мода. Той също е написан на C++ и работи в интерактивен режим.

Входни данни: програмата изисква списък с имена на текстови файлове, които се използват за текущо изчисляване на стойности за карта на съответствията. Списъкът може да съдържа:

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

- един елемент – при необходимост да се проследят стойностите за конкретен пач; или
- повече от един елементи – например ако целта е да се определят стойностите за всички пачове, които съдържат определено метеорологично явление, заснето с конкретно устройство.

В хода на изпълнение на програмата, зададените текстови файлове се отварят последователно в режим „четене“. От тях се обработват последователни 100 реда, съответстващи на 100 кадъра. Минимална, средна и максимална стойност, мода и девиация се изчисляват за всеки от проследяваните параметри.

Крайните резултати се записват в CSV (Comma Separated Values) формат, с цел структуриране на информацията и последващ анализ.

В таблица 1 е показан пример за общ вид на създадена карта. Данните са извлечени от видео-запис на 29 юли 2025 г. Метеорологичните условия са за дъжд. А обектът – облаци се намира в област, обозначена с пач номер 3.

Легенда:

min –минимална стоност, *max* -максимална стойност, *mode* – мода;

av – средна стойност, *dev*-девиация (вкл. като индекси)

R,G,B – цветообразуващи компоненти за всеки пиксел – ст-ти между 0 и 255,

DCP – подсветка -ст-ти между 0 и 255;

I– интензитет – ст-ти между 0 и 255,

S – наситеност – ст-ти между 0 и 1,

H – цветови тон – ст-ти между 0 и 359;

RGB – данни от обекта;

XYZ.x, XYZ.y – координати за цветност

CCT_M1, CCT_M2 – корелирана цветова температура в K, пресметната по съответния метод.

Таблица 1 Примерна карта от един запис

условия	параметър	имена - txt файл	Стойности за пач/обект (осредняване в поредица от 100 кадъра за всеки запис селектирани по метео условия)				
			min	max	av	dev	mode
дъжд	Rav	A53S_20250729_100932_3	170	190	186	2.91	186
	Gav		184	205	201	3,17	202
	Bav		196	219	214	3,43	217
	DCPav		169	190	185	3,02	187
	Rdev		16.4	28.5	18.3	2.46	16.6
	Gdev		10.8	33.1	14.3	4.53	11.1
	Bdev		5.7	37.3	10.5	6.63	5.8
	DCPdev		16.4	30.5	18.5	2.68	16.6
	I		183	204	200	3.17	202
	S		0.13	0.14	0.14.	0.001	0.14
	RGB XYZ.x		0.321	0.322	0.321	0.0001	0.321
	RGB XYZ.y		0.325	0.325	0.325	0	0.325
	DCP XYZ.x		0.352	0.367	0.357	0.003	0.354
	DCP XYZ.y		0.246	0.270	0.257	0.003	0.247
	RGB H		207	208	208	0.05	208
	RGB CCT_M1		6001	6043	6028	6.18	6035
	RGB CCT_M2		5999	6041	6027	6.18	6034
	DCP H		307	320	312	2.84	310
	DCP CCT_M1		2754	4077	3540	208.4	3441
	DCP CCT_M2		2801	3954	3423	180.6	3333

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Така направеното описание обобщава методика, която включва няколко етапа:

- Предварителен анализ на съществуващите връзки видим обект – цифрови данни;
- Избор на оценявани числени параметри;
- Избор на статистически оценки;
- Софтуерна реализация на обработката;
- Структуриране на получаваната информация.

Крайният продукт представляват множество карти, класифициращи данните според конкретни метеорологични усло-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

вия, атмосферни обекти и устройства за регистрация.

Всяка карта позволява допълване както с още параметри така и с осреднени данни от множество записи. Крайното предназначение на картите е обслужване на база данни и е насочено към съставяне на автономна система за класификация на атмосферни обекти и метеорологични условия на базата на видео-записи.

Създадените специализирани програмни приложения могат да бъдат използвани за обработка на произволни видео-последователности.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] ICC 1:2004-10 “Image technology colour management — Architecture, profile format, and data structure”, 2004.

[2] R.Castelli, P.Frolkovic, C.Reinhardt, C. C Stolk, J. Tomczyk, & A. Vromans. “Fog detection from camera images“. In E.Cator, & R. J. Kang (Eds.), Proceedings of the 114th European Study Group Mathematics with Industry: SWI 6, 2016, pp.25-43.

[3] M. Roser and A. Geiger, "Video-based raindrop detection for improved image registration," IEEE 12th, ICCV Workshops, 2009, pp. 570-577,
doi: 10.1109/ICCVW.2009.5457650

[4] H. Archana, M. Priya, A. Muthukumaravel, “Rain or Snow Removing in a Single Color Image - A Novel Algorithm”, International Journal of Pure and Applied Mathematics 118 (20), 2018, pp.923-933.

[5] P. Pavlova, B. Pachedjieva, „Investigation on the possibilities of tracking dynamic visibility changes in images“, Proc. XXX International Scientific Conference Electronics - ET2021, September 15 - 17, 2021,
doi: 10.1109/ET52713.2021.9579821.

[6] P. Pavlova, B. Pachedjieva, D. Petrova, "Analysis of loss of visibility in video-sequences", Межд. ежегодна научна конференция „Мехатроника, еко и енергоспестяващи системи и технологии“ Пловдив, 2023.

[7] Complete guide for correlated color temperature, https://www.ledvance.com/en-us/professional-lighting/insights/blog/lighting-basics/correlated-color-temperature (accessed 4 May 2026).

[8] L. Sungmin Lee, Seokmin Yun, Ju-Hun Nam, Chee Sun Won and Seung-Won Jung, “A review on dark channel prior based image dehazing algorithms”, EURASIP Journal on Image and Video Processing 2016:4, (2016)
doi 10.1186/s13640-016-0104-y.

[9] V. Domonkos, “No-Reference Image Quality Assessment with Global Statistical, Features”, Journal of Imaging vol.7(2):29, February, 2021, doi: 10.3390/jimaging7020029.

[10] A. Charles, “Fundamentals of Imaging Colour Spaces”, https://www.uni-weimar.de>3-ima-color-spaces17.pdf (accessed 4 May 2026).

[11] С.В Новаковский, “Цвет в цветном телевидении”, Москва, Радио и связь 1988 ISBN 5-256-00090-X.

[12]https://dsp.stackexchange.com/questions/8949/how-tocalculate-the-color-temperature-tint-of-the-colors-in-animage (accessed 4 May 2026).

[13] http://www.brucelindbloom.com (accessed 4 May 2026).

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ'2026

ПРОЕКТИРАНЕ НА РАЗШИРЕНИЕ НА СИСТЕМАТА FAS 200 В ЛАБОРАТОРИЯТА ПО ИНТЕЛИГЕНТНИ АВТОМАТИЗИРАНИ ПРОИЗВОДСТВЕНИ СИСТЕМИ

EXTENSION DESIGN OF THE SYSTEM FAS 200 IN THE LABORATORY ON INTELLIGENT AUTOMATED MANUFACTURING SYSTEMS

Albena Taneva
Control Systems Department
Technical University of Sofia,
Plovdiv Branch

Michail Petrov
Control Systems Department
Technical University of Sofia,
Plovdiv Branch

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

Abstract

The idea of this paper is to describe a design project of extension the flexible assembly system in the laboratory of intelligent automated manufacturing systems. In this case the aim is to present a possibility to include an additional palletizing station to the existed laboratory manufacturing system. The laboratory set up has five stations with a conveyor between each one. This equipment offers flexible training according to the industrial reality, simulating a real assembly process and including different technologies from Industry 4.0 and Industry 5.0. The assembly system consists of an automated cells with five separate stages and a conveyor: assembly, handling, quality inspection, transfer and warehouse. It is the fruitful option to research and training in automation area. The main advantage is that it has fully modularity in keeping with industrial reality. The technologies included in its different assembly modules, as well as the assembly process with several variants, allow the user to develop the innovative ideas required by advanced automation. In this work the additional control approach of input palletizing is presented with a collaborative robot and supervisory control of its function. Additionally, the robot control box and an appropriate software implementation for robot control are integrated and programmed into the system software environment. This can be viewed as a custom approach for control solution and a part of intelligent systems. Hence, the aim of this article is to present the new extension in development in the laboratory on intelligent automated manufacturing systems.

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

INTRODUCTION

The automated manufacturing environment has been the ultimate goal of industrial companies that for a few decades already existed. Years ago the idea was to put forward with the rise of the Computer Integrated Manufacturing (CIM) [1] in the early 1980s. Nowadays communication technologies, big data analytics, Industry 4.0 technologies, complex solutions, integrate electronic components and modules, enable automation possibilities of new business models.

The fourth industrial revolution, referred to as Industry 4.0 [2], represents the next level of information technology use. It is the first industrial revolution that described something that was yet to happen. The fourth industrial revolution assumes full automation of production and the emergence of autonomous control in production, thanks to the Internet of Things, which will connect individual devices.

The fifth Industrial revolution [3] is a new vision of the European Commission, which is related to the trend of Society 5.0. Industry 5.0 is often not considered an "industrial

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

revolution", as it is more a definition of a new vision and goals to be achieved, but unlike previous revolutions, it does not bring technological progress. Industry 5.0 is just connected with continuous implementation of artificial intelligence (AI) and collaborative robots (Fig. 1).

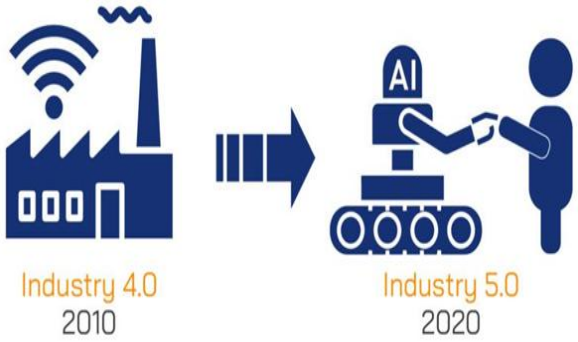


Fig. 1. *From Industry 4.0 to Industry 5.0.*

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

However, one may say a small number of companies still aims for fully automated manufacturing. Only the automated factory with an optimal supported flexible workforce can lead the industry to an efficient mass-customization of goods. To achieve these goals, FAS is pivotal as shown in the next section.

The aim of this article is to present basic hardware components of an assembly system, discuss it characteristics and describe some real applications [6], [7]. In the next section the custom configuration of the FAS is given.

SYSTEM FAS 200 DESCRIPTION

This is the description of a particular configuration of FAS, installed at laboratory of Intelligent Automated Manufacturing Systems in the Centre of Competence “Smart Mechatronic, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies “(Fig. 2). It is described a training equipment in mechatronics connected with Industry 4.0 technologies.

Fig. 2. *Overall view of the equipment.*

The FAS 200 [5] is comprised of different stations, each performing a part of assembly process. Each station includes a flexible automation cell which carries out an assembly operation involving a number of predetermined parts with different possibilities. The parts are transported consequently to the connected modules with corresponding stoppers and precision lifters-positioners. Parts are mounted on pallets. The process modules function either independently of the transport system, in single or couple modes, or integrated into it, in cell mode. Each station has its own electrical panel, where the wiring system are fully visible, while new elements may be fitted to the panel if it is necessary. The users may design and build their own projects and subsequently integrate them in the station. The front of each station incorporates the start, stop, step-by step/continuous cycle and reset pushbuttons. In addition, the control

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

pushbuttons incorporate a main switch on/off and emergency pushbuttons for emergency stops. The system is modular and may be extended, which allowed a future incorporation of other process modules according to the user needs. In addition to transport processes between cells a linear conveyor is added, and is composed by a long line, connecting the five modules to facilitate the envisaged assembly process. The available units are presented below as follows:

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

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

The parts of assembling process are evident on the Fig. 3.

***Fig. 3**. Parts of the assembling process.*

EXTENSION DESIGN OF THE FAS 200

This section aims to describe the complete designed process and components in order to get a better understanding of the processes it accomplishes. The design process concern extension of the evident in the laboratory flexible assembly system FAS 200 with additional palletizing or disassembling station. This station similar to the others in the system could by supplied with a collaborative robot. In this case is chosen a small universal robot type UR3e [8].

The UR3e (Fig.4) is designed to streamline assembly, inspection, dispensing and material handling processes. It can be mounted on workbenches or directly in production facilities and works safely side by side with humans. Its integrated safety features, including force sensors and collision detection, ensure smooth human-machine collaboration.

***Fig.4.** UR3e compact robot.*

The robot is delivered with the control box (Fig. 5), which contains the I/O modules, its processing unit and robot and tool power supply amongst other components. With the control box, the teach pendant is also included

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

for robot supervision, control, and programming.

The standard package contains a UR3e robotic arm, control unit, teach pendant (optional with 3-position release device), power cable, connection cable and documentation. The teach pendant uses the market-leading PolyScope software [10] for intuitive control. The control unit is a lightweight, compact and central hub for power, safety and communication.

Fig.5. *UR3e control box.*

For product manipulation, ROBOTIQ 2F-85 electric gripper (Fig. 6) is implemented as the robot's tool, which has been selected to fit product dimensions and payload demands. It counts with the plug and play feature for an effortless installation [9].

Fig.6. *2F-85 ROBOTIQ electric gripper.*

The robotic arm will be installed onto the same mounting table used in the laboratory. The board on the table is the one installed by SMC onto the FAS 200, achieving an even more seamless integration. Positioned next to FAS-203 station, proper separation from the rest of the modules for optimal robot workspace is guaranteed. It permits a comfortable installation of the control box.

U3e technical specifications:

- UR3e robotic arm:
- Reach: 500 mm.
- Degrees of freedom: 6 rotating joints.
- Footprint: 128 mm in diameter.
- Weight: 11,2 kg.
- I/O ports: 2 digital in, 2 digital out, 2 analogue in.
- Tool connector type: M8 8-pin.

– Payload (Fig. 7): 3 kg maximum payload, 1.4 kg maximum payload at 400 mm center of gravity offset.

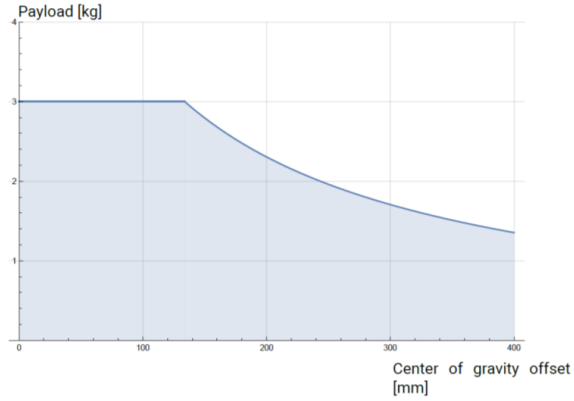


Fig.7. *Payload - center of gravity chart for UR3e.*

U3e control box:

- Dimensions: 460 mm in width, 254 mm in depth, 449 mm in height.
- Weight: 12 kg. - I/O ports: 16 digital in, 16 digital out, 2 analog in, 2 analog out, 4 quadrature digital inputs.
- Communication: 500 Hz Control frequency, Modbus TCP, PROFINET, Ethernet/IP, USB 2.0, USB 3.0.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

ROBOTIQ 2F-85 technical specifications:
- Stroke: 85 mm.
- Grip force: 20 to 235 N.
- Form-fit grip payload: 5 kg.
- Friction grip payload: 5 kg.
- Gripper weight: 0.9 kg.
- Closing speed: 20 to 150 mm/s.
- IP rating: IP40

Worktable construction specifications:
- Dimensions: 1200 mm in length, 762 mm in width, 900 mm in height.
- Table board: used on the stations FAS 200. 1200 mm in length, 762 mm in width, 25 mm in height. Manufacturer: SMC.
- Table legs: put together for the implementation of the table board and the mounting of the control box. 40 mm in length, 80 in width, 875 mm in height.

There is a possible additional function of the extended module with the UR3e collaborative robot. This is at the end of the transport line where it is necessary disassembly of the pallet after quality control. This function is opposite of palletizing function in the beginning.

The installed machinery is the same as the described in the previous UR3e palletizing cobot submodule expect for the end-effector.

The selected tool for this disassembly implementation is a part of the same product line as the other robot's, this is the electric gripper ROBOTIQ 2F-140 (Fig. 8). It has been selected because of its wider stroke, required for pallet picking.

The idea of this extensions and design is taken from SMC company flexible assembly system – FAS 200 special edition with Industry 4.0 technologies [11].

Fig.8. *2F-140 ROBOTIQ electric gripper.*

ROBOTIQ 2F-140 technical specifications:
- Stroke: 140 mm.
- Grip force: 10 to 125 N.
- Form-fit grip payload: 2.5 kg.
- Friction grip payload: 2.5 kg.
- Gripper weight: 1 kg.
- Closing speed: 30 to 250 mm/s.
- IP rating: IP40.

For configuring and programming of cobot UR3e it will be used a special control panel (Fig. 9) and a teach pendant programmed by PolyScope software platform.

Fig.9. *UR3e programming panel.*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

CONCLUSION

The presented FAS was enlarged with two functionalities: palletizing operation in the beginning and disassembling of the pallet after quality control at the end of the conveyer. The engineered ampliation to the current system is considered to meet all of the set goals: it is realistically implementable both technically and economically, it counts with a seamless integration of all components, it takes into consideration aspects like machinery lifespan and maintenance, etc. Most importantly, it undoubtedly levels up the current system's productivity and degree of automation in the most effective and efficient devised manner. It also introduces new technologies to the automation like cobot manipulation and electric end-effector configuration, which further improves student quality education on automatic systems and industrial production. These ensure a more modern and practical approach to pupil instruction. Regarding the processes it conducts, all of assembly, palletizing and disassembly procedures have been implemented and tailored for an efficient functioning.

ACKNOWLEDGMENT

This research was funded by the European Regional Development Fund within the OP "Research, Innovation and Digitalization Programme for Intelligent Transformation 2021-2027", Project No BG16RFPR002-1.014-0005 Center of competence "Smart mechatronics, eco- and energy-saving systems and technologies".

REFERENCES

[1] M.P. Groover, "Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing", Harlow, Pearson Education, 2014.

[2] Industry 4.0 - What works, what doesn't, AUAboutLean.com [online]. 2017 https://www.allaboutlean.com/industry-4-0-potentials/

[3] AEWIN Technologies Co. Ltd. (2024). The New Revolution- Industry 5.0 https://www.aewin.com/application/the-new-revolution-industry-5-0/ [4] SMC Networks. FAS-200 User Manual. 2020, p. 97.

[4] N. Asadi, Flexibility in Assembly Systems using Product Design, Ph.D. dissertation, Mälardalen University Press Dissertations., Printed by E-Print AB, Stockholm, Sweden, 2017.

[5] SMC International Training. https://www.smctraining.com/

[6] A. Ahmadi, C. Cherifi, V. Cheutet, Y. Ouzrout. "Recent Advancements in Smart Manufacturing Technology for Modern Industrial Revolution: A Survey". Journal of Engineering and Information Science Studies, 2020. p. 21, hal-03054284.

[7] S. Liang, M. Rajora, "Intelligent Manufacturing Systems: A Review," in International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research Vol. 7, No.3, 2018, [Online] Available: https://www.researchgate.net/publication/324598110 .

[8] Universal Robots. "UR3e." Accessed June 11, 2024. https://www.universal-robots.com/products/ur3-robot/.

[9] ROBOTIQ. "2F-85 and 2F-140 Grippers." Accessed June 11, 2024. https://robotiq.com/products/2f85-140-adaptive-robot gripper?ref=nav_product_new_button.

[10] Software Handbook PolyScope 5. Copyright © 2009–2024 by Universal Robots A/S. https://www.universal-robots.com/manuals/EN/PDF/SW5_19/Poly5_handbook_online/eSeries_Software_Handbook_en_Global.pdf

[11] FAS-200 special edition with Industry 4.0 technologies. https://www.smctraining.com/product/industry-4-0/fas-200-se-i4-0

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

РАЗРАБОТВАНЕ НА КАМЕРА ЗА КАЛИБРИРАНЕ НА МУЛТИСЕНЗОРНИ СИСТЕМИ ОТ ТИП „ЕЛЕКТРОНЕН НОС“

DEVELOPMENT OF A CALIBRATION CHAMBER FOR MULTISENSOR ELECTRONIC NOSE SYSTEMS

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

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

Kostadin Zikatanov
Technical University of Gabrovo

Stanimir Yordanov
Technical University of Gabrovo

Abstract
This paper presents the development of a calibration chamber for testing and calibrating multisensor electronic nose systems. The chamber was designed and manufactured using 3D printing technology. The structure incorporates a gas circulation and homogenization system based on a fan and a diffusion grid, enabling the creation of a controlled and repeatable measurement environment.
The proposed chamber can be used both for the calibration of individual gas sensors and for experimental studies involving various electronic nose systems developed in Laboratory C3.1 “Sensors and Sensor Systems”. The developed system provides stable measurement conditions and is suitable for applications related to the analysis, classification, and identification of volatile organic compounds and various food products.

Keywords: electronic nose, gas sensors, calibration chamber, 3D printing, multisensor systems.

ВЪВЕДЕНИЕ

През последните години системите от тип „електронен нос“ (e-nose) се утвърдиха като обещаваща технология за анализ и класификация на различни миризми и летливи органични съединения. Те представляват мултисензорни устройства, които имитират човешкото обоняние чрез използване на масив от газови сензори в комбинация с алгоритми за обработка на данни и методи за машинно обучение. Приложението на системите от тип „електронен нос“ е особено широко в хранително-вкусовата промишленост, където качеството и свежестта на продуктите са от критично значение.

Многобройни изследвания демонстрират ефективността на системите от тип „електронен нос“ при оценка на качеството на месото. Например системи за идентифициране на свежестта на говеждо месо чрез използване на сензорни масиви и невронни мрежи [1], както и за класификация на пилешко месо с помощта на методи като Support Vector Machine и машинно обучение [2, 3], показват висока точност и надеждност. Подобни подходи са прилагани за класификация на смеси от месни продукти [4], прогнозиране на микробни популации в морски дарове [5] и оценка на

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

качеството на раци [6].

При изследвания на морски дарове, например при скариди [7], с помощта на такива системи са установени корелации между данните от сензорите и физикохимичните показатели.

Приложенията при продукти от растителен произход също са широко разпространени. Различни автори са разработили системи от тип „електронен нос“ за определяне на зрелостта на домати чрез използване на дълбоки невронни мрежи [8–10], както и за мониторинг на качеството на доматено пюре чрез невронни мрежи и размита логика [11, 12]. Системи от тип „електронен нос“ са използвани и при оценка на качеството на авокадо [13], както и за общ мониторинг на влошаване на качеството на плодове и зеленчуци [14].

Освен в хранителната индустрия, технологията е прилагана и при подправки [15], масла [16, 17], кафе [18], оризово вино [19], спиртни напитки [20] и зехтин [21, 22]. В тези изследвания системите от тип „електронен нос“ се комбинират с разнообразни алгоритми – от класически подходи като Principal Component Analysis (PCA) и Support Vector Machine (SVM) до съвременни методи за дълбоко обучение, които значително повишават селективността и точността на системите.

Тези разработки подчертават, че системите от тип „електронен нос“ имат потенциала да допълнят или заменят традиционните лабораторни методи, които често са скъпи, отнемат много време и изискват сложна подготовка на пробите. В този контекст настоящата работа е фокусирана върху разработването на прототип на калибрираща камера, която може да се използва както при калибриране на газови сензори, така също и при събиране на данни за различни продукти с помощта на системи от тип „електронен нос“.

ОСНОВНИ ИЗИСКВАНИЯ КЪМ КАЛИБРИРАЩАТА КАМЕРА

Камерата за калибриране на газовите сензори представлява ключов елемент при разработването и експлоатацията на системи от тип „електронен нос“, тъй като осигурява контролирана среда за подаване, смесване и измерване на газови проби. Основното предназначение на подобна камера е да гарантира висока повторяемост на измерванията, стабилни експериментални условия и минимално влияние на външни фактори върху показанията на сензорите. Това е важно при приложения, свързани с класификация и идентификация на летливи органични съединения, където дори малки изменения в условията на измерване могат да доведат до отклонения в изходните резултати.

Едно от основните изисквания към камерата е осигуряването на добра херметичност. Наличието на течове води до неконтролирано навлизане на външен въздух и промяна в концентрацията на анализираното вещество, което компрометира процеса на калибриране. Поради тази причина конструкцията трябва да включва надеждни уплътнения, а местата за свързване на входящите и изходящите линии да бъдат проектирани така, че да минимизират риска от изтичане и загуба на измереното съдържание на камерата. При използване на 3D принтиране тези изисквания трябва да се отчитат, като се подберат правилните материали за изработване на камерата.

Материалите трябва да бъдат химически устойчиви към анализираните вещества и да не взаимодействат с тях чрез абсорбция, адсорбция или отделяне на летливи съединения. Това е важно, тъй като дори минимално замърсяване може да повлияе на резултатите.

Камерата трябва също така да осигурява равномерно разпределение на газовата смес в измервателния обем. Неравномер-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

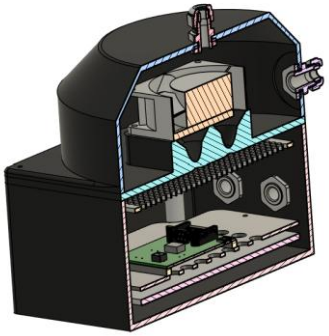
ната концентрация на анализираното вещество може да доведе до различни отклици между отделните сензори в масива, което затруднява процесите на обучение и класификация при системите от тип „електронен нос“. За постигане на хомогенност е необходимо правилно разполагане на входните и изходните отвори, както и използване на вентилатор за принудителна циркулация на въздуха в работния обем.

ПРОЕКТИРАНЕ НА МОДЕЛА НА КАЛИБРИРАЩАТА КАМЕРА

Проектирането на 3D модела на калибриращата камера е извършено с програмния продукт за триизмерно моделиране Fusion на Autodesk. Моделът включва няколко основни части, които са проектирани по начин, позволяващ лесното им отпечатване на 3D принтер.

На фиг. 1 е представен 3D моделът на разработената камера.

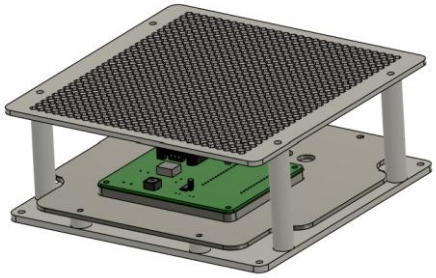
(а)



(б)

Фиг. 1. *3D модел на камерата: (а) - общ вид, (б) - в разрез*

Основните части в разработения модел са корпус на камерата, вътрешен капак с вентилатор и горен капак на вентилатора. В корпуса на камерата се разполага държач на „електронния нос“, към който с помощта на винтове може да се прикрепи и дифузионна решетка – фиг. 2.



Фиг. 2. *Вътрешна структура с дифузионна решетка*

Задачата на дифузионната решетка е да разделя въздушния поток, идващ от вентилатора, при което да се постига по-добра хомогенност на намиращата се в камерата газова смес.

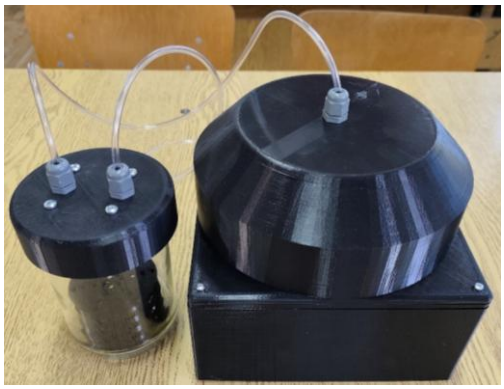
Газовата смес постъпва в камерата от външен съд (фиг. 3), в който се разполага пробата на тестваното вещество. Връзката между камерата и външния съд се реализира от двойка силиконови маркучи, през които, вследствие на работата на вентилатора, се осъществява циркулацията на газовата смес.

Фиг. 3. *Външен съд за тествано вещество*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

РЕАЛИЗИРАНЕ НА РАЗРАБОТЕНАТА КАМЕРА

За изработване на корпуса на камерата и основните нейни компоненти е използван PETG (полиетилен терефталат гликол) материал. PETG се характеризира с добра механична здравина, висока устойчивост на удар и ниска склонност към деформация. Освен това PETG притежава добра химична устойчивост към широк спектър от вещества, включително алкохоли и част от органичните разтворители, което е особено важно при работа с летливи органични съединения и газови смеси. Неговата относително ниска порьозност след 3D принтиране допринася за намаляване на нежелаената абсорбция на газове и ограничаване на остатъчните миризми в камерата. Това е съществен фактор при калибриране на газови сензори, тъй като остатъчната адсорбция може да доведе до замърсяване между последователни измервания и до влошаване на повторяемостта на резултатите. Допълнително предимство на PETG в сравнение с PLA (полимлечна киселина) - другия широко разпространен материал за 3D печат, е неговата добра температурна устойчивост, като материалът може да работи стабилно при по-високи температури без деформация. Тази негова особеност позволява използването му в камери, където се използват сензори със собствени нагреватели и висока работна температура. На фиг. 4 е представена реализираната камера за калибриране, отпечатана от PETG материал.



Фиг. 4. *Общ вид на реализираната камера*

Между отделните части на камерата се разполагат уплътнители, принтирани от TPU (термопластичен полиуретан) материал. TPU материалът се характеризира с висока еластичност и гъвкавост, което го прави подходящ за изработване на уплътнителни елементи, гъвкави връзки и виброизолиращи компоненти в конструкцията на камерата. Благодарение на способността си да компенсира механични неточности и да осигурява плътно прилепване между отделните елементи, TPU може значително да подобри херметичността на системата. Това е особено важно в настоящия случай, защото дори малки течове на газ могат да доведат до промяна в концентрацията на анализираното вещество и съответно - до грешки в измерванията. На фиг. 5 са представени използваните в конструкцията TPU уплътнители.

Фиг. 5. *Уплътнители на базата на TPU материал*

Основните компоненти на камерата се присъединяват един към друг с помощта на винтови съединения. Връзката между камерата и стъкления съд за измерваните вещества се осъществява посредством 5 mm силиконов маркуч.

Всички кабели, излизащи от камерата, преминават през съответните щуцери, с чиято помощ се изолира достъпът на въздух до вътрешността на камерата.

С реализираната камера могат да се използват различни типове „електронен

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

нос“. Екипът на лаборатория С3.1 „Сензори и сензорни системи” към Центъра за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“ има разработени варианти на мултисензорни системи от тип „електронен нос“, използващи сензори на европейски, японски и китайски производители, които също могат да намерят приложение в представената камера за тестване и калибриране.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата работа е представена разработката на калибрираща камера за тестване и калибриране на мултисензорни системи от тип „електронен нос“. Предложената конструкция е проектирана с помощта на CAD среда Autodesk Fusion и е изработена чрез технология за 3D принтиране, което позволява бързо прототипиране, ниска себестойност и възможност за лесна модификация спрямо конкретните изисквания на различни бъдещи експериментални приложения. Реализираната система за циркулация и хомогенизиране на газовата смес допринася за създаването на стабилна и повторяема измервателна среда, което е от съществено значение за коректното функциониране и калибриране на газовите сензори. Представената камера позволява интегриране на различни системи от тип „електронен нос“, създадени с използването на различни газови сензори.

Получените резултати от първоначалните тестове показват, че разработената калибрираща камера представлява подходяща платформа за провеждане на контролирани измервания при различни приложения на тези системи и в бъдеще тя ще намери приложение в изследователската дейност, провеждана в лаборатория С3.1 „Сензори и сензорни системи” на Центъра за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] Amalia, A.; Rivai, M.; Purwanto, D. Indoor Beef Quality Identification Using Gas Sensor Array and Probabilistic Neural Network Method. In Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Mechatronics Systems (AIMS), Virtual, 22–23 February 2024; pp. 1–5.

[2] Mada Sanjaya, W.S.; Roziqin, A.; Purnama Sari, N.A.M.; Sintia, P.; Alamsyah, F.; Putra, T.F.; Taqwim, A.; Mubasyir, F.H.; Temiesela, A.W.; Zaman, M.F.B.; et al. Chicken Meat Freshness Evaluation using Support Vector Machine Method and Raspberry Pi 4 based Electronic Nose. In Proceedings of the 2023 IEEE 9th Information Technology International Seminar (ITIS), Batu Malang, Indonesia, 18–20 October 2023; pp. 1–6.

[3] Anwar, H.; Anwar, T. Quality assessment of chicken using machine learning and electronic nose. Sens. Bio-Sens. Res. 2025, 47, 100739.

[4] Laga, S.A.; Sarno, R. Optimal Sample Temperature of Electronic Nose For Detecting Beef and Pork Mixture. In Proceedings of the 2019 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT), Yogyakarta, Indonesia, 24–25 July 2019; pp. 398–402.

[5] Zakaria, E.; Wijaya, D.R.; Gunawan, T. Predicting Microbial Populations in Seafood using Support Vector Regression Algorithms and Electronic Nose. In Proceedings of the 2023 International Conference on Artificial Intelligence Robotics, Signal and Image Processing

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

(AIRoSIP), Yogyakarta, Indonesia, 9–10 August 2023; pp. 280–284.
[6] Hermawan, L.M.; Novamizanti, L.; Wijaya, D.R. Crab Quality Detection with Gas Sensors Using a Machine Learning. In Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence Systems (IoTaIS), Bali, Indonesia, 28–30 November 2024; pp. 270–275.
[7] Jiang, C.; Ning, J.; Mei, Z.; Chen, J.; Gao, Y.; Yi, X.; Wu, P. Development of food electronic nose for prawn (macrobrachium rosenbergii) quality rapid assessment and their relationship with the physicochemical index. Int. J. Food Prop. 2021, 24, 346–353.
[8] Padilla, D.A.; Krystine, D.; Anticuando, M.; Directo, C.K.R. An Electronic Nose Approach in Identifying Ripe Tomato Fruit Using LeNet-5 Structure. In Proceedings of the 2024 7th International Conference on Information and Computer Technologies (ICICT), Honolulu, HI, USA, 15–17 March 2024; pp. 223–227.
[9] Anticuando, M.K.D.; Directo, C.K.R.; Padilla, D.A. Electronic Nose and Deep Learning Approach in Identifying Ripe Lycopersicum esculentum L. Tomato Fruit. In Proceedings of the 2022 13th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), Kharagpur, India, 3–5 October 2022; pp. 1–6.
[10] Affognon, L.; Diallo, A.; Diallo, C.; Ezin, E.C. Supervised Learning Models for Tomato Quality Prediction Using Electronic Nose Data. In Proceedings of the 2023 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET), Cape Town, South Africa, 16–17 November 2023; pp. 1–6.
[11] Concepcion, R.S.; Sybingco, E.; Lauguico, S.C.; Dadios, E.P. Implementation of Multilayer Perceptron Neural Network on Quality Assessment of Tomato Puree in Aerobic Storage using Electronic Nose. In Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM), Bangkok, Thailand, 18–20 November 2019; pp. 65–70.
[12] Concepcion, R.S.; Bandala, A.A.; Bedruz, R.A.R.; Dadios, E.P. Fuzzy Classification Approach on Quality Deterioration Assessment of Tomato Puree in Aerobic Storage using Electronic Nose. In Proceedings of the 2019 IEEE 11th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM), Laoag, Philippines, 29 November–1 December 2019; pp. 1–6.
[13] Elbi, M.D.; Özgören Çapraz, E.; ¸Sahin, E.; Koyuncuo˘glu, M.U.; Tuncer, C. A classification based on support vector machines for monitoring avocado fruit quality. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg. 2024, 30, 343–353.
[14] Caya, M.V.C.; Cruz, F.R.G.; Fernando, C.M.N.; Lafuente, R.M.M.; Malonzo, M.B.; Chung, W.Y. Monitoring and Detection of Fruits and Vegetables Spoilage in the Refrigerator using Electronic Nose Based on Principal Component Analysis. In Proceedings of the 2019 IEEE 11th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM), Laoag, Philippines, 29 November–1 December 2019; pp. 1–6.
[15] Yunxiang, L.; Tianwei, L. Study on electronic nose and algorithm for identification of spice. In Proceedings of the 2016 First IEEE International Conference on Computer Communication and the Internet (ICCCI), Wuhan, China, 13–15 October 2016; pp. 518–521.
[16] Gonzalez Viejo, C.; Fuentes, S. Digital Detection of Olive Oil Rancidity Levels and Aroma Profiles Using Near-Infrared Spectroscopy, a Low-Cost Electronic Nose and Machine Learning Modelling. Chemosensors 2022, 10, 159.
[17] Oates, M.J.; Fox, P.; Sanchez-Rodriguez, L.; Ángel, A. Carbonell-Barrachina.; Ruiz-Canales, A. DFT based classification of olive oil type using a sinusoidally heated, low cost electronic nose. Comput. Electron. Agric. 2018, 155, 348–358.
[18] Rasekh, M.; Karami, H.; Wilson, A.D.; Gancarz, M. Classification and Identification of Essential Oils from Herbs and Fruits Based on a MOS Electronic-Nose Technology. Chemosensors 2021, 9, 142.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

[19] Chen, I.T.; Chen, C.C.; Dai, H.J.; Rianto, B.; Huang, S.K.; Lee, C.H. An Incremental Learning Method for Preserving World Coffee Aromas by Using an Electronic Nose and Accumulated Specialty Coffee Datasets. IEEE Trans. Agrifood Electron. 2024, 2, 12–27.

[20] Zheng, W.; Wang, Y.; Liang, X.; Zhang, A. Origin identification for rice wines based on an electronic nose and convolution dot-product attention mechanism. Sens. Actuators A Phys. 2024, 375, 115521.

[21] Harnsoongnoen, S.; Babpan, N.; Srisai, S.; Kongkeaw, P.; Srisongkram, N. A Portable Electronic Nose Coupled with Deep Learning for Enhanced Detection and Differentiation of Local Thai Craft Spirits. Chemosensors 2024, 12, 221.

[22] Viejo, C.G.; Fuentes, S.; Godbole, A.; Widdicombe, B.; Unnithan, R.R. Development of a low-cost e-nose to assess aroma profiles: An artificial intelligence application to assess beer quality. Sens. Actuators B Chem. 2020, 308, 127688.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

ПОВЪРХНОСТНИ СВОЙСТВА НА МАСЛОРАЗТВОРИМИ ПОЛИГЛИЦЕРИЛ ОЛЕАТИ НА ГРАНИЦАТА МАСЛО/ВОДА

SURFACE PROPERTIES OF OIL-SOLUBLE POLYGLYCERYL OLEATES AT OIL/WATER INTERFACES

Rumyana Stanimirova[1,2], Krassimir Danov[1,2], Jordan Petkov[2,3,4]

[1]*Department of Chemical & Pharmaceutical Engineering, Faculty of Chemistry & Pharmacy, Sofia University “St. Kliment Ohridski”, 1164 Sofia, Bulgaria*
[2]*Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"*
[3] *Arxada, Hexagon Tower, Crumpsall Vale, Blackley, Greater Manchester, Manchester M9 8GQ, UK*
[4] *Biological Physics, School of Physics and Astronomy, The University of Manchester, Schuster Building,Oxford Road, Manchester M13 9PL, UK*

Abstract
Polyglycerol esters are nonionic surfactants whose surface properties depend on the number of polyglycerol units and oleic chains. We study four types of oil-soluble polyglyceryl oleates dissolved in sunflower oil to clarify the effect of the molecular structure on the adsorption at oil/water interfaces. The interfacial tension isotherms are measured and theoretically analyzed using the van der Waals adsorption model for nonionic surfactants, allowing determination of the adsorption and pair interaction energies and the excluded molecular areas in the adsorption layers. P1-1-O, with one oleic chain and one polyglycerol unit, shows weak pair interactions and a low adsorption energy, leading to a gradual adsorption. P3-4-O, with three polyglycerol units and four oleic chains, exhibits intermediate behavior with a moderate pair interaction energy and a smoother tension decrease. P10-10-O, containing multiple oleic chains and a larger headgroup, obeys strong intermolecular interactions and a high adsorption energy, resulting in an efficient interfacial tension reduction and dense adsorption layers. P10-1-O behaves differently due to its asymmetric structure and partial solubility in both phases, which causes deviations from the single-component model and very low interfacial tensions at higher concentrations. The obtained results are the basis for the design of emulsification compositions.

Keywords: oil-soluble polyglycerol esters; isotherms of oil/water interface; interfacial physicochemical parameters; adsorption and interfacial activity.

INTRODUCTION

Polyglycerol esters (PGE) are nonionic surfactants with a wide range of molecular structures based on polymerized glycerol units esterified with fatty acids. Depending on the degree of polymerization and the type of fatty acid, their molecules can vary from more linear to more branched structures, with different arrangements of hydrophilic and lipophilic segments. This structural flexibility strongly affects their physicochemical properties [1–3]. Because of their biocompatibility, biodegradability, and low toxicity, PGEs are widely used in food, cosmetic, pharmaceutical, and oil-related applications, as well as in the stabilization of emulsions and other colloidal systems [3–9]. In recent years, many studies have focused on the relationships between the surfactant structure and the interfacial properties. Even

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

small changes in the PGE molecular structure can significantly affect its adsorption, interfacial rheology, emulsion stability, etc. In comparison with conventional low molecular weight surfactants, PGEs exhibit considerably more complex behavior due to the broad distribution of the headgroup sizes, the varying degrees of esterification, and the coexistence of multiple hydrophilic and hydrophobic segments within the molecules. Despite their broad industrial application, the mechanism of adsorption and the surface properties of oil-soluble PGEs at oil/water interfaces remain insufficiently understood.

In our previous work, we have examined both water-soluble and oil-soluble polyglycerol esters with different chain lengths in order to understand how molecular structure governs their colloidal and interfacial properties. The bulk and interfacial properties, the adsorption, the foam formation and stability were investigated for water-soluble PGEs [10]. For the oil-soluble systems [11], the focus was placed on their structuring in aqueous media and emulsifying ability. These studies demonstrate that the balance between the hydrophilic polyglycerol units and the hydrophobic fatty acid chains plays a key role in determining both bulk organization and interfacial properties.

Here, we investigate oil-soluble polyglyceryl oleates dissolved in sunflower oil as representative systems for studying the relationship between the molecular structure and the interfacial behavior at oil/water interfaces. The interfacial tension between sunflower oil and water in the presence of different polyglyceryl oleates is measured over a broad concentration range. The experimental data are analyzed using the van der Waals adsorption model for nonionic surfactants in order to determine the interfacial physicochemical parameters: adsorption constants; pair intermolecular interaction energies; adsorption energies; excluded molecular areas in the respective adsorption layer. The effect of the number of oleic chains and the polyglycerol units on the adsorption and the interfacial activity is discussed. The obtained results provide insight into how molecular structure affects intermolecular interactions and interfacial tension reduction in oil-soluble polyglycerol ester systems, which is important both from fundamental viewpoint and application-oriented perspective.

MATERIALS AND METHODS

We studied a wide range of oil-soluble polyglycerol esters of fatty acids with different degrees of polymerization and identical oleic chain length, supplied by Arxada (Manchester, UK). PGEs are produced by esterification of a polydisperse polyglycerol mixture with naturally derived fatty acids. The polymerization reaction of glycerol proceeds via a step-growth mechanism, which leads to a broad spectrum of oligomers (di-, tri-, and higher polyglycerols), see Fig. 1a in Ref. [9]. As a result, the headgroup sizes in the final polyglycerol esters are distributed around a mean value rather than being monodisperse. The specific glycerol and polyglycerol esters were as follows: Aldo® MO KFG (denoted below as P1-1-O) is monoglyceryl mono-oleate ester; Geomulse™ O13 RSPO MB (P10-1-O) is polyglyceryl-10 mono-oleate ester; Geomulse™ O3 RSPO MB (P10-10-O) is polyglyceryl-10 deca-oleate ester; Polyaldo 3-4-O (P3-4-O) is polyglyceryl-3 tetra-oleate ester. All samples were used as received without further purification.

The oil used for interfacial tension measurements was sunflower seed oil (SFO) obtained from a local supplier. To remove the surface-active impurities, SFO was purified by passing it through a column filled with Silica Gel and Florisil adsorbent. The purification was considered sufficient when the interfacial tension against pure water reached ~31 mN/m and remained stable

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

within ±0.2 mN/m over 60 min.

All measurements were performed at 25 °C at oil/water interface with deionized water purified by the Elix 3 water purification system (Millipore). The specific resistivity of deionized water was 18.2 MΩ·cm.

Interfacial tension measurements were performed using Drop Shape Analyzer DSA 100 Expert (Krüss, Germany). The polyglycerol esters were dissolved in purified sunflower oil, and measurements were carried out against pure water.

EXPERIMENTAL RESULTS AND THEORETICAL INTERPRETATION

The experimental interfacial tension isotherms were analyzed using the van der Waals model for nonionic surfactants. The adsorption, Γ, is related to the surfactant concentration, c, through the following isotherm [10,12]:

$$Kc = \frac{\Gamma\alpha}{1-\Gamma\alpha}\exp\left(\frac{\Gamma\alpha}{1-\Gamma\alpha} - \frac{2\beta}{k_B T}\Gamma\right) \qquad (1)$$

Here k_B is the Boltzmann constant, T is the absolute temperature, K is the adsorption constant, α is the excluded surface area of the surfactant molecule, and β is the pair interaction energy. The respective two-dimensional equation of state reads:

$$\sigma = \sigma_0 - k_B T\Gamma\left(\frac{1}{1-\Gamma\alpha} - \beta_s\frac{\Gamma\alpha}{2}\right) \qquad (2)$$

Here: σ is the interfacial tension; σ_0 is the interfacial tension without added surfactant; v is the volume of the PGE molecule; the dimensionless pair interaction parameter, β_s, and the energy of adsorption, E, are defined as follows [10,13]:

$$\beta_s \equiv \frac{2\beta}{k_B T\alpha} \quad \text{and} \quad K = v\exp\left(\frac{E}{k_B T}\right) \qquad (3)$$

All physicochemical parameters (K, α, β_s) were obtained by fitting the experimental interfacial tension data using the van der Waals adsorption model, Eqs. (1) and (2).

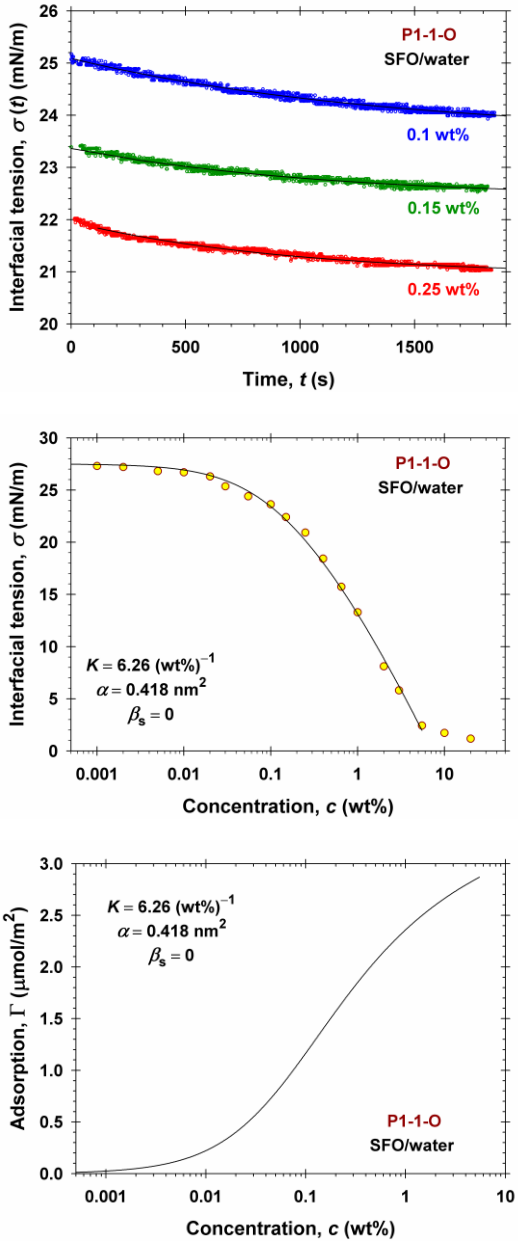


***Fig. 1**. (A) Kinetics of the interfacial tension for P1-1-O. The solid lines correspond to the best exponential fits. (B) Interfacial tension isotherm. The solid line therein represents the best theoretical fit using the van der Waals isotherm. (C) The calculated adsorptions vs concentrations.*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Monoglyceryl mono-oleate ester P1-1-O. Fig. 1A shows the kinetics of the interfacial tension measured for three representative concentrations of P1-1-O. The interfacial tension, σ, decreases rapidly during droplet formation, followed by a slower relaxation that can be well described by an exponential decay (solid lines in Fig. 1A). This indicates that the adsorption process is barrier controlled [13].

The experimental data for P1-1-O equilibrium interfacial tension (symbols) are shown in Fig. 1B. The solid line therein corresponds to the best fit using the model with the following physicochemical parameters: $K = 6.26$ (wt%)$^{-1}$; $\alpha = 0.418$ nm^2; and negligible value of the interaction parameter, $\beta_s \approx 0$. The corresponding adsorption isotherm, calculated from the theoretical model, is shown in Fig. 1C. The respective saturation adsorption is 2.87 μmol/m^2. The estimated excluded area per molecule, α, is relatively small, which is consistent with the smallest size of the surfactant head group compared to other studied oil-soluble PGEs. The average molecular weight of P1-1-O is $M_w = 356.5$ g/mol and the molecular volume of P1-1-O is $v = 0.592$ nm^3. Thus, the adsorption energy can be estimated to be $E = 6.44\ k_BT$, see Eq. (3). As can be expected, the adsorption energy of P1-1-O is considerably lower than that of water-soluble PGEs [10], because for oil-soluble surfactants the surface properties are primarily governed by the hydrophilic head groups.

Polyglyceryl-10 deca-oleate ester P10-10-O. Fig. 2A summarizes the experimental data for the interfacial tension relaxation, $\sigma(t)$, for three typical concentrations of P10-10-O. Compared to P1-1-O (Fig. 1A), the initial decrease in interfacial tension during droplet formation is noticeably slower, which can be attributed to the larger molecular size of P10-10-O. The slow decrease of the interfacial tension at longer times is well described by an exponential decay (solid lines in Fig. 2A). Thus, the adsorption process is controlled by an adsorption barrier.

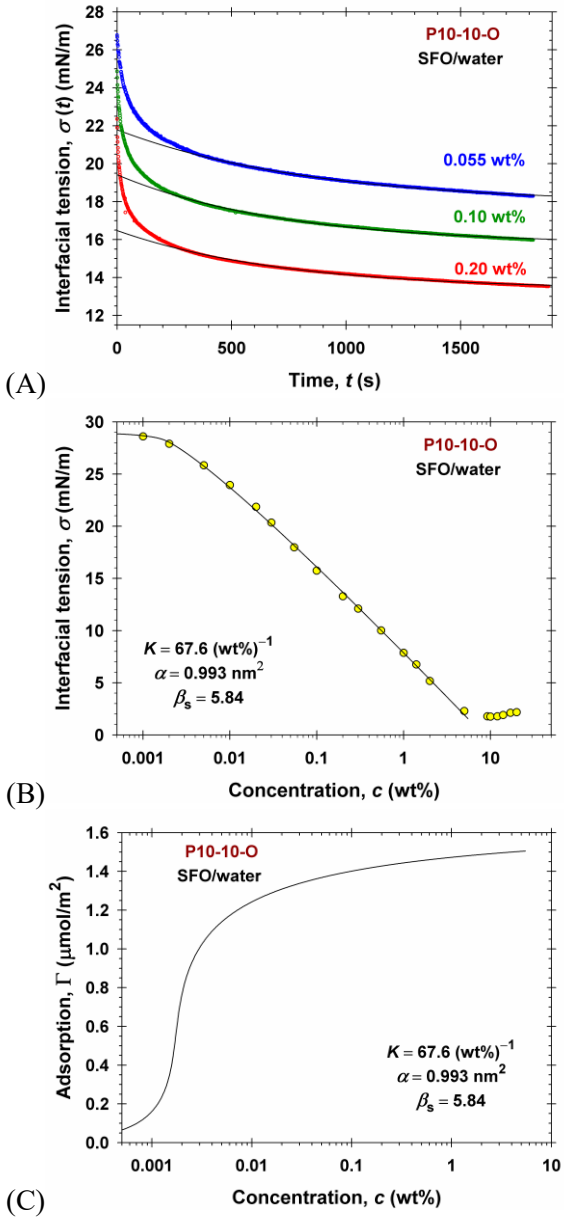


***Fig. 2**. (A) Relaxation of interfacial tension with time for P10-10-O. The solid lines correspond to the best exponential fit. (B) Interfacial tension isotherm. The solid line corresponds to the best theoretical fit using the van der Waals isotherm. (C) The calculated adsorptions vs concentrations.*

The experimental data (symbols) for the equilibrium values of the interfacial tension

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

for P10-10-O oil solutions are shown in Fig. 2B. The solid line in Fig. 2B corresponds to the best fit using the theoretical model with the following obtained parameters: K = 67.6 (wt%)$^{-1}$; α = 0.993 nm^2; and a large value of the interaction parameter, β_s = 5.84. For P10-10-O, considerable intermolecular attractions within the adsorption layer take place. According to the van der Waals adsorption model, a phase transition occurs at β_s > 6.75. In the present case, the obtained value of 5.84 remains below the threshold and the adsorption layer is in a “gaseous state”.

The excluded area per molecule, α, is considerably larger than that for P1-1-O, because of the larger size of the surfactant head group. The average molecular weight of P10-10-O is approximately 3403 g/mol and v = 5.651 nm^3. Using these values of M_w, v, and K, we estimated the value of the adsorption energy to be 8.82 k_BT. The higher adsorption energy compared to that of P1-1-O is consistent with the presence of the larger number of the polyglycerol units in the surfactant head.

The calculated adsorptions vs concentrations are presented in Fig. 2C. As should be, the value of the saturation adsorption for P10-10-O of 1.50 μmol/m^2 is lower than that of P1-1-O because of the larger excluded area per molecule.

Polyglyceryl-3 tetra-oleate ester P3-4-O. The adsorption behavior of P3-4-O follows a similar trend to P1-1-O and P10-10-O. The interfacial tension decreases rapidly during the initial stage of adsorption, which is dominated by diffusion, and it is followed by a slower relaxation process (Fig. 3A). The latter is described by an exponential dependence, indicating a barrier-controlled adsorption. The head group of P3-4-O is smaller than that of P10-10-O and the adsorptions at same concentrations are lower.

The experimental (symbols) and theoretical (solid line) interfacial tension isotherms for P3-4-O are presented in Fig. 3B. The obtained values of the fitting parameters are: K = 29.0 (wt%)$^{-1}$; α = 0.962 nm^2; and β_s = 3.77.

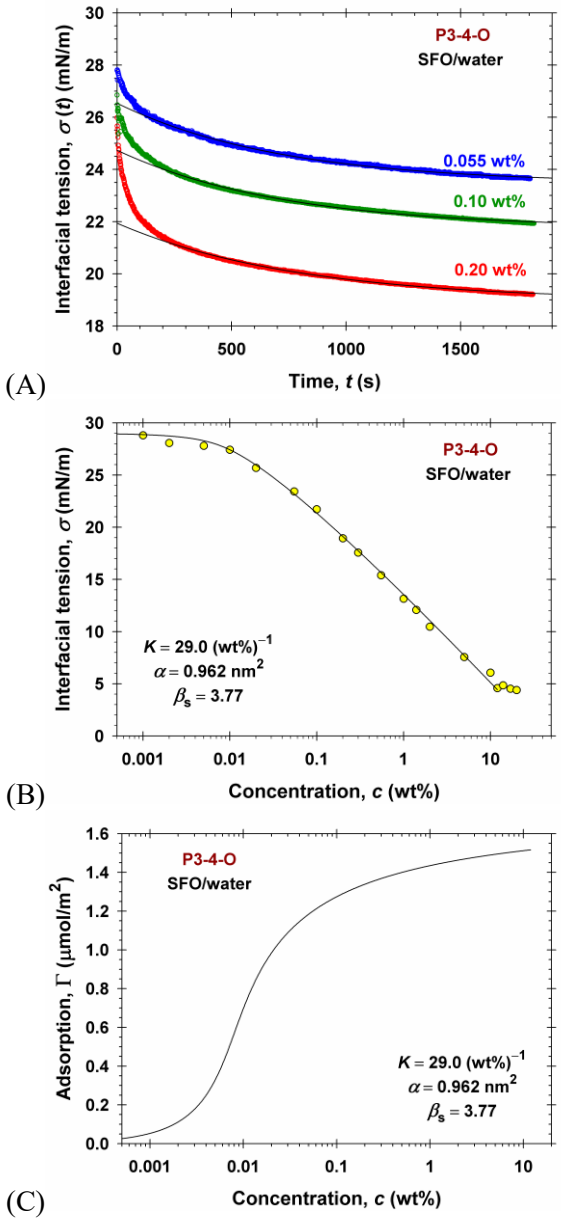


***Fig. 3**. (A) Interfacial tension relaxation for P3-4-O. The solid lines correspond to the best exponential fit. (B) Interfacial tension isotherm. The solid line shows the best fit results using the van der Waals isotherm. (C) The calculated adsorptions vs concentrations.*

Compared to P10-10-O, the interaction parameter β_s is smaller, suggesting a weaker

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

pair interaction energy within the adsorption layer. Note that the molecule of P3-4-O contains lower numbers of polyglycerol units in the surfactant head and of the hydrophobic oleic chains. The obtained value of β_s is below the surface phase transition and the adsorption layer is in a “gaseous state”. The P3-4-O excluded molecular area is similar to that obtained for P10-10-O. Note that the value of α depends on the size of surfactant head and on the pair interaction energy between adsorbed molecules.

The average molecular weight of P3-4-O is M_w = 1298 g/mol and the molecular volume is 2.155 nm^3, so that, the adsorption energy can be estimated to be E = 7.97 k_BT. The adsorption energy is slightly lower than that of P10-10-O, which is consistent with the smaller polyglycerol head group. At the same time, it remains considerably higher than that of P1-1-O, reflecting the intermediate molecular structure of P3-4-O.

The calculated dependence of the adsorption, Γ, on the bulk concentration, c, is shown in Fig. 3C. The value of the saturation adsorption for P3-4-O is 1.52 μmol/m^2.

Polyglyceryl-10 mono-oleate ester P10-1-O. Fig. 4 shows the experimental data for the equilibrium interfacial tension vs concentration measured for P10-1-O solutions. In this case the experimental data cannot be fully described using the single-component van der Waals model. According to the supplier information, P10-1-O contains a mixture of different components (see Table 1), which contributes to the more complex isotherm. Our previous studies showed that P10-1-O is partially soluble in both oil and water phases [10]. This may lead to deviations from the model assumptions. At higher concentrations (c > 0.5 wt%), the interfacial tension reaches very low values of about 0.55 mN/m.

The surface properties and adsorptions of the studied surfactants are governed by the size of the polyglycerol head group and the balance between hydrophilic polyglycerol units and hydrophobic oleic chains. These two structural factors determine how the molecules pack at the interface and how the adsorption depends on the bulk concentration. To draw the more transparent conclusions, the obtained experimental data and theoretical descriptions are summarized in Fig. 5 in terms of molar concentrations. The physicochemical parameters are listed in Table 2.

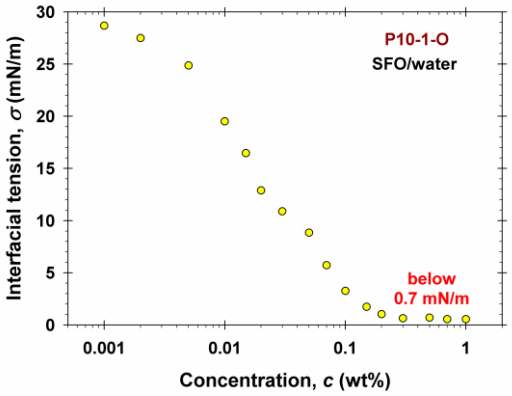


Fig. 4. *Experimental data for the interfacial tension vs concentration of P10-1-O.*

Table 1. *Composition of P10-1-O and average molecular mass.*

		%	M_w
1-1-O	glycerol	4.72	356.6
2-1-O	di-	21.75	430.7
3-1-O	tri-	19.67	504.8
4-1-O	tetra-	14.92	578.8
5-1-O	penta-	10.76	652.9
6-1-O	hexa-	10.00	727.0
7-1-O	hepta-	7.91	801.1
8-1-O	octa-	5.52	875.2
9-1-O	nona-	3.11	949.3
10-1-O	deca-	1.52	1023.4
Average molecular mass:			596.6

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

P1-1-O has the simplest structure, the smallest molecular area of 0.418 nm², the lowest adsorption energy of 6.44 k_BT, and negligible pair interactions between adsorbed molecules. As a result, the adsorption increases more gradually with concentration (Fig. 5B) compared to the other surfactants.

Table 2. *Physicochemical parameters of PGEs at 25 °C calculated from the interfacial tension isotherms fitted using the van der Waals model.*

	P1-1-O	P10-10-O	P3-4-O
K (wt%$^{-1}$)	6.26	67.6	29.0
α (nm^2)	0.418	0.993	0.962
β_s (–)	0	5.84	3.77
E (k_BT)	6.44	8.82	7.97
v (nm^3)	0.592	5.651	2.155

Different interfacial properties are observed for P10-10-O. This surfactant contains ten oleic chains and ten polyglycerol units and exhibits much stronger surface activity. The adsorption rises sharply even at low concentrations, leading to an efficient decrease in interfacial tension (Fig. 5). The larger adsorption energy of 8.82 k_BT and interaction parameter of 5.84 indicate the formation of a dense adsorption layer with strong intermolecular attractions.

P3-4-O shows intermediate behavior between P1-1-O and P10-10-O. Both the adsorption energy and the intermolecular interactions are lower than those for P10-10-O but higher than those for P1-1-O, resulting in a smoother adsorption isotherm and more gradual reduction of σ.

The behavior of P10-1-O emphasizes the importance of molecular structure. This surfactant contains ten polyglycerol units but only one oleic chain, giving rise to a highly asymmetric structure. The compositional heterogeneity of the sample and the partial solubility of P10-1-O in both oil and water leads to a complex adsorption mechanism and to the extremely low interfacial tension.

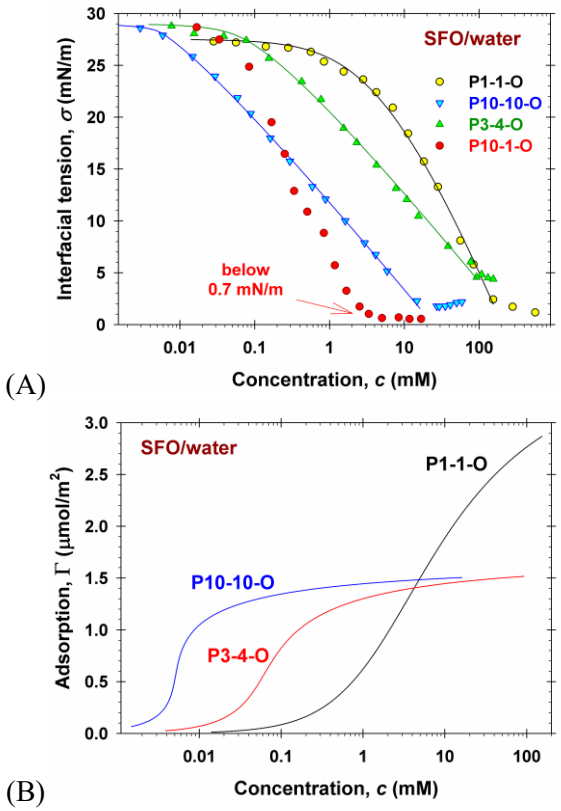


Fig. 5. *Comparison of all studied PGEs: A) interfacial tension isotherms; B) calculated adsorptions vs concentrations.*

CONCLUSIONS

The adsorption and interfacial properties of the studied polyglycerol esters are strongly influenced by the molecular structure, particularly by the balance between the number of oleic chains and polyglycerol units. Surfactants containing multiple oleic chains, such as P10-10-O and P3-4-O, exhibit stronger intermolecular interactions and higher adsorption energies, resulting in a more efficient reduction of the interfacial tension. They could be useful for the preparation of fine emulsions under low-energy emulsification processes. P1-1-O shows weaker interactions and a smoother adsorption behavior due to its simpler

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

structure with a single oleic chain and monoglycerol head group, which may be advantageous when slower adsorption dynamics or more flexible interfacial layers are required. P10-1-O displays the most complex adsorption behavior, because of its asymmetric structure and partial solubility in both oil and water phases, which leads to ultra-low interfacial tensions and applications involving spontaneous emulsification.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was funded by the European Regional Development Fund within the OP "Research, Innovation and Digitalization Programme for Intelligent Transformation 2021-2027", Project No BG16RFPR002-1.014-0005 Center of competence "Smart mechatronics, eco- and energy-saving systems and technologies".

REFERENCES

[1] Hemker W. Associative structures of polyglycerol esters in food emulsions. J. Am. Oil Chem. Soc. 1981;58:114–119. https://doi.org/10.1007/BF02672194.

[2] Mclntyre R. Polyglycerol esters. J. Am. Oil Chem. Soc. 1979;56:835A–840A. https://doi.org/10.1007/BF02667458.

[3] Usha HS, Maitra S. Synthesis characterization and application of polyglycerol esters of fatty acids: Biodegradable surfactants. J. Dispers. Sci. Technol. 2016;37:41–47. https://doi.org/10.1080/01932691.2015.1025137.

[4] Fan Z, Zhao Y, Preda F, Clacens J-M, Shi H, Wang L, Feng X, De Campo F. Preparation of bio-based surfactants from glycerol and dodecanol by direct etherification. Green Chem. 2015;17:882–892. https://doi.org/10.1039/C4GC00818A.

[5] Shikhaliev KS, Stolpovskaya NV, Krysin MY, Zorina AV, Lyapun DV, Zubkov FI, Yankina KY. Production and emulsifying effect of polyglycerol and fatty acid esters with varying degrees of esterification. J. Am. Oil Chem. Soc. 2016;93:1429–1440. https://doi.org/10.1007/s11746-016-2894-6.

[6] Flume MM, Bergfeld WF, Belsito DV, Hill RA, Klaasen CD, Liebrer DC, Marks JG, Shank RC, Slaga TJ, Snyder PW, Gill LJ, Heldreth B. Safety assessment of polyglyceryl fatty acid esters as used in cosmetics. Int. J. Toxicol. 2023;42:5S–101S. https://doi.org/10.1177/10915818231174440.

[7] Shima M, Kobayashi Y, Kimura Y, Adachi S, Matsuno R. Effect of the hydrophilic surfactants on the preparation and encapsulation efficiency in course and fine W/O/W type emulsions. Colloids Surf. A 2004;238:83–90. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2004.02.018.

[8] Belenki C, Wilkenmann M, Nieger M, Gerlinger W, Sachweh B, Schuchmann HP, Muller T, Bräse S. Cleavable surfactants to tune the stability of W/O miniemulsions. J. Colloid Interface Sci. 2013;393:203–209. http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2012.10.072.

[9] Ai S, Ishitobi M. Effects of the number of fatty acid residues on the phase behaviors of decaglycerol fatty acid esters. J. Colloid Interface Sci. 2006;296:685–689. http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2005.09.029.

[10] Stanimirova RD, Danov KD, Georgiev MT, Petkov JT. Colloid, interface, and foam properties of water-soluble polyglycerol esters solutions. J. Colloid Interface Sci. 2025;677:250–263. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2024.07.219.

[11] Stanimirova R, Georgiev M, Danov K, Petkov J. Aqueous solutions of oil-soluble polyglycerol esters: Structuring and emulsifying abilities. Molecules 2025;30:4507. https://doi.org/10.3390/molecules30234507 .

[12] Uzinova RI, Stanimirova RD, Danov KD. Interfacial and bulk properties of volatile amphiphiles and sodium dodecyl sulfate mixtures. Molecules 2026;31:1256. https://doi.org/10.3390/molecules31081256.

[13] Danov KD, Valkovska DS, Kralchevsky PA. Adsorption relaxation for nonionic surfactants under mixed barrier-diffusion and micellization-diffusion control. J. Colloid Interface Sci. 2002;251:18–25. https://doi.org/10.1006/jcis.2002.8358.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

РАЗРАБОТВАНЕ НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПЛАТФОРМА С ВЪЗМОЖНОСТ ЗА ИНТЕГРИРАНЕ НА ИЗКУСТВЕН ИНТЕЛЕКТ ЗА СЛЕДЕНЕ НА СЛЪНЦЕТО И МОНИТОРИНГ НА ФОТОВОЛТАИЧНИ ПАНЕЛИ

DEVELOPMENT OF AN AI-READY EXPERIMENTAL PLATFORM FOR SOLAR TRACKING AND PHOTOVOLTAIC MONITORING

Misho Matsankov
Technical University of Sofia, Branch Plovdiv
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Atanas Radulov
Technical University of Sofia, Branch Plovdiv

Mario Dechev
Technical University of Sofia, Branch Plovdiv

Abstract
This paper presents the approach to the design and manufacture of an experimental stand for studying the operation of photovoltaic panels with automatic sun tracking. The system is built with two photovoltaic panels (monocrystalline and polycrystalline) with a power of 10 W and a voltage of 18 V, the goal being to implement intelligent positioning relative to the sun and at the same time to measure, record and analyze the main electrical and physical parameters. The NVIDIA Jetson Orin Nano platform was chosen as the main computing module for the system, which provides high computing power, the ability to process data in real time and future expansion of the system with artificial intelligence, a camera and web-based monitoring. The system includes two electrical meters, three temperature sensors, a real-time clock, photoresistors, a pyranometer, an analog-to-digital converter and a motor drive for positioning the panels. The developed stand allows for measurement of voltage, current, power, temperature, solar radiation and illumination, and the data can be saved in CSV format for subsequent processing in Microsoft Excel. The implementation of such a system creates an opportunity for practical research of the efficiency of photovoltaic panels under different conditions.

Keywords: photovoltaic monitoring; solar tracking system; photovoltaic panels; NVIDIA Jetson Orin Nano; pyranometer; intelligent energy systems; data acquisition; artificial intelligence; renewable energy; solar irradiance measurement.

INTRODUCTION

In recent years, the utilization of renewable energy sources has gained increasing importance due to the continuously growing demand for electrical energy, the rising cost of conventional energy resources, and the necessity to reduce harmful emissions released into the atmosphere. Among the most extensively utilized renewable energy sources is solar energy, which can be directly converted into electrical energy through photovoltaic (PV) panels.

The efficiency and overall performance of photovoltaic systems are influenced by numerous factors, including solar irradiance intensity, panel operating temperature, angle of solar incidence, atmospheric conditions, and electrical loading conditions. In the case

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

of fixed-mounted photovoltaic panels, the optimal orientation relative to the sun is achieved only during a limited period of the day. During the remaining time intervals, solar radiation reaches the panel surface at non-optimal incidence angles, resulting in reduced energy conversion efficiency and consequently lower electrical energy generation.

One of the effective approaches for increasing the energy yield of photovoltaic installations is the implementation of solar tracking systems. Such systems automatically adjust the orientation of photovoltaic panels to maintain alignment with the direction of maximum solar irradiance. This enables improved utilization of the available solar energy throughout the entire daily cycle and creates conditions for enhanced overall system efficiency.

The primary objective of the present study is the design and development of an experimental test bench intended to demonstrate the operating principle of an intelligent solar tracking and photovoltaic monitoring system. The proposed experimental platform is designed for practical measurements, educational activities, and research applications. The developed system enables continuous observation of the main operating parameters, data acquisition and storage, as well as analysis of the influence of various environmental and operational factors on the generated electrical energy output.

In order to achieve the defined objective, the following research and engineering tasks must be addressed:

1. Selection of an appropriate computational platform for system control and data processing.
2. Selection and integration of photovoltaic panels.
3. Development of a measurement system for current, voltage, and electrical power.
4. Temperature measurement using digital temperature sensors.
5. Measurement of solar radiation by means of a pyranometer.
6. Selection of components for panel orientation and positioning.
7. Implementation of a photovoltaic panel positioning system.
8. Development of a solar tracking algorithm.
9. Data logging in a format suitable for subsequent processing and analysis in Microsoft Excel.
10. Provision of future system scalability, including potential integration of wind speed measurement, a web-based interface, a camera module, and artificial intelligence capabilities [1-11].

STATEMENT

The developed experimental platform represents a small-scale photovoltaic system consisting of two photovoltaic panels, each rated at 10 W with a nominal operating voltage of 18 V. The panels are mounted on a movable mechanical structure that enables continuous adjustment of their orientation relative to the position of the sun. The movement is achieved посредством a motor-driven mechanism controlled by the main processing unit of the system.

The experimental setup comprises three major subsystems, namely a measurement subsystem, a control subsystem, and a data acquisition and storage subsystem. The measurement subsystem is responsible for collecting information related to the electrical characteristics of the photovoltaic panels, including voltage, current, and power, as well as temperature, illumination level, and solar irradiance measurements. The control subsystem processes the acquired information and determines the required positioning commands for the photovoltaic panels in order to achieve optimal solar tracking conditions. The data acquisition subsystem provides continuous recording and storage of

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

the measured parameters in files suitable for subsequent processing and analysis.

The central computing platform of the developed system is based on the NVIDIA Jetson Orin Nano module. This platform was selected due to its high computational performance and its capability for future expansion toward intelligent monitoring, advanced automation, and data-driven system management. In contrast to conventional microcontroller-based solutions, the Jetson platform enables operation under a Linux environment, processing of large datasets, implementation of graphical user interfaces, integration of imaging systems, and application of artificial intelligence algorithms for advanced analysis and decision-making processes.

Main Components of the Developed System

The developed experimental platform consists of several hardware and software modules responsible for photovoltaic energy conversion, parameter monitoring, solar tracking, data acquisition, and system control.

1. Photovoltaic Panels – The experimental setup incorporates two photovoltaic modules, namely one monocrystalline and one polycrystalline panel, each having a rated power of 10 W and nominal operating voltage of 18 V. These panels serve both as the primary electrical energy source and as the main object of investigation. Their implementation allows evaluation of the influence of panel orientation, operating temperature, and solar radiation incidence angle on the generated electrical power. Each panel is monitored independently through dedicated current and voltage measurement channels, enabling comparative analysis of the performance characteristics and efficiency under different environmental and operating conditions.

2. Main Controller Unit – The NVIDIA Jetson Orin Nano module is employed as the principal computational platform of the developed system. It performs the function of a central controller responsible for data acquisition from all sensing elements, processing of the measured information, and execution of panel positioning commands. Compared with conventional microcontroller-based solutions, this platform enables implementation of more advanced computational algorithms. In addition to standard sensor acquisition tasks, the system architecture allows future expansion toward web-based monitoring interfaces, database integration, remote access, image processing using cameras, and artificial intelligence algorithms for prediction of optimal photovoltaic orientation [12].

3. Electrical Parameter Measurement Subsystem – Two INA219 measurement modules are employed for monitoring voltage, current, and electrical power. Both modules communicate through the I2C interface and provide independent measurement channels for the respective photovoltaic panels or individual system sections. The use of separate sensing modules enables simultaneous monitoring and comparative analysis of the electrical behavior of both photovoltaic technologies [13].

4. Temperature Measurement Subsystem – Temperature represents one of the most significant factors influencing photovoltaic conversion efficiency. Variations in panel temperature directly affect the electrical performance and power output; therefore, continuous monitoring is required for accurate system analysis. The developed setup incorporates three DS18B20 digital temperature sensors used for measuring the temperatures of both photovoltaic panels and the surrounding ambient environment [14].

5. Pyranometer – Solar irradiance measurements are performed using a pyranometer, allowing quantitative determination of incident solar radiation

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

expressed in W/m². The obtained irradiance data enable more detailed investigation of photovoltaic system efficiency. Correlation between measured solar radiation and generated electrical power provides assessment of the actual operating performance of the system.

6. Real-Time Clock Module – A DS3231 real-time clock (RTC) module is integrated into the system to provide accurate date and time information for each measurement record. This enables association of every acquired parameter with a specific time instant. The RTC functionality ensures reliable timestamp generation even during temporary power interruptions or system restarts.

7. Solar Orientation Sensors – The determination of the direction corresponding to maximum solar illumination is achieved using photoresistive sensors. These sensing elements are arranged in different spatial positions. When solar radiation is not uniformly distributed across all photosensitive elements, differences in measured values occur. These deviations are processed by the tracking algorithm to determine the required correction direction for panel orientation. Depending on whether single-axis or dual-axis tracking is implemented, two or four photosensitive elements may be employed, respectively.

8. Analog-to-Digital Conversion Unit – Since the NVIDIA Jetson Orin Nano platform does not provide integrated analog input channels, unlike controllers such as Arduino, an external analog-to-digital converter ADS1115 is used [15]. The photoresistive sensors are connected to this module, which converts the analog voltage signals into digital values and transmits them to the Jetson controller via the I2C communication interface. This arrangement enables seamless integration of analog sensors into the overall monitoring and control algorithm [12].

9. Mechanical Positioning Drive System – The photovoltaic tracking mechanism may be implemented using either stepper motors with dedicated drivers or servo actuators, depending on the mechanical configuration of the structure. For larger and heavier constructions, stepper motors such as NEMA 23 combined with TB6600 or DM542 drivers are recommended due to their high torque capability and precise positioning characteristics. For lighter constructions and small-scale photovoltaic modules, the TD-8120MG servo motor can also be applied.

10. Data Acquisition and Storage – One of the primary functions of the developed test bench is continuous recording of measured parameters. The selected storage format is CSV, as it provides compatibility with Microsoft Excel, LibreOffice Calc, and other mathematical and statistical data processing software environments.

11. Software Implementation – The software architecture of the developed monitoring and control system executes the operational sequence illustrated in Fig. 1. The implemented algorithm performs sensor acquisition, signal processing, solar tracking control, data logging, and preparation of information for further analysis and visualization.

The control algorithm can be implemented in Python under a Linux operating environment. Python represents a suitable programming language for this application, as it provides a wide range of established libraries for sensor communication, file handling, graphical visualization, web-based interfaces, and artificial intelligence applications. At the initial stage, the system may operate using only local data logging in CSV format. At a later stage, the software architecture can be extended by integrating a local web server capable of displaying real-time graphical representations of the measured parameters.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

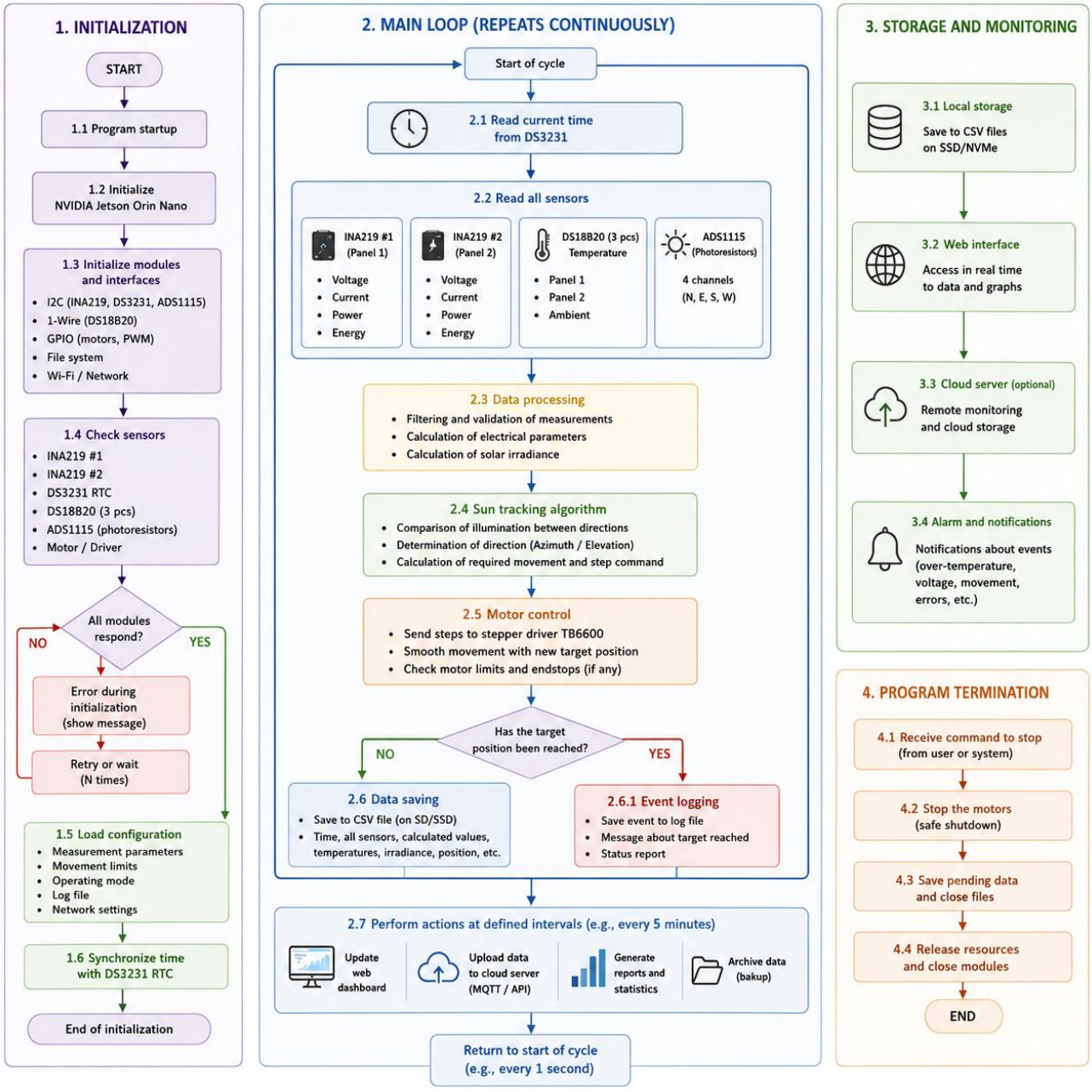


***Figure 1**. Software and control algorithm flowchart of the developed experimental platform*

RESULTS

The developed system is expected to enable evaluation of the influence of photovoltaic panel orientation relative to the sun on the overall performance of the installation. By correlating data obtained from the photovoltaic panels, pyranometer measurements, and temperature sensors, dependencies between solar irradiance, operating temperature, panel position, and generated electrical power can be identified.

Continuous data logging over time will allow the generation of graphical representations

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

and the analysis of system behavior during different periods of the day.

Depending on future requirements, the experimental platform can be further upgraded in several directions. One possible extension is the integration of a camera for monitoring the position of the sun and cloud coverage. Another potential development is the implementation of artificial intelligence algorithms for predicting the optimal panel position based on previous measurements and current meteorological conditions.

A web-based monitoring platform may also be added to provide real-time visualization of the measured data. Furthermore, the system can be configured to transmit information to a cloud server, MQTT broker, or database, enabling remote monitoring and long-term comparative analysis.

Additional functionalities may include automatic return of the panels to their initial position in the evening, wind protection under strong wind conditions, and implementation of a safe shutdown mode.

CONCLUSION

This paper presents the design and development of an experimental platform intended for intelligent solar tracking and monitoring of photovoltaic panels. The developed system employs two photovoltaic modules with a rated power of 10 W and nominal voltage of 18 V, controlled by the advanced computational platform NVIDIA Jetson Orin Nano.

The system integrates sensors for measuring current, voltage, electrical power, temperature, illumination level, and solar irradiance. The combined application of photoresistive sensors and a pyranometer provides information both regarding the direction of maximum illumination and the actual solar radiation conditions. The implemented motor-driven positioning mechanism enables automatic orientation of the photovoltaic panels in order to improve system efficiency.

The developed experimental platform represents a suitable basis for educational, laboratory, and research applications. It enables not only monitoring of photovoltaic panel operation but also analysis of the relationships between solar irradiance, operating temperature, panel position, and generated electrical power.

Furthermore, the implementation of the NVIDIA Jetson Orin Nano platform provides opportunities for future expansion through integration of web interfaces, imaging systems, artificial intelligence algorithms, and cloud-based monitoring solutions. Consequently, the proposed system can be considered a modern research platform for the investigation and development of intelligent energy systems and advanced photovoltaic monitoring technologies.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was funded by the European Regional Development Fund within the OP “Research, Innovation and Digitalization Programme for Intelligent Transformation 2021-2027”, Project No BG16RFPR002-1.014-0005 Center of competence “Smart mechatronics, eco- and energy-saving systems and technologies”.

REFERENCES

[1] T. Markvart and L. Castañer, *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*, 2nd ed., Elsevier, Oxford, UK, 2009.

[2] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2011.

[3] M. A. Green, *Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 1982.

[4] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Engineering of Thermal Processes, 4th ed., Wiley, Hoboken, NJ, USA, 2013.

[5] S. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, 2nd ed., Academic Press, London, UK, 2014.

[6] N. Kalogirou and D. Tripanagnostopoulos, “Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production,” *Energy Conversion and Management*, vol. 47, no. 18–19, pp. 3368–3382, 2006.

[7] M. Benghanem, “Optimization of tilt angle for solar panel installations,” *Applied Energy*, vol. 88, no. 6, pp. 2215–2221, 2011.

[8] A. Mellit and S. A. Kalogirou, “Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: A review,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 34, no. 5, pp. 574–632, 2008.

[9] H. Mousazadeh et al., “A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 8, pp. 1800–1818, 2009.

[10] International Electrotechnical Commission (IEC), *IEC 61724-1: Photovoltaic System Performance – Monitoring*, Geneva, Switzerland, 2021.

[11] International Electrotechnical Commission (IEC), *IEC 61215: Terrestrial Photovoltaic Modules – Design Qualification and Type Approval*, Geneva, Switzerland, 2021.

[12] NVIDIA Corporation, *NVIDIA Jetson Orin Nano Developer Kit User Guide*, NVIDIA Documentation, Santa Clara, CA, USA, 2024.

[13] Texas Instruments, *INA219 Zerø-Drift, Bidirectional Current/Power Monitor with I2C Interface – Datasheet*, Texas Instruments, Dallas, TX, USA, 2023.

[14] Maxim Integrated, *DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer Datasheet*, Maxim Integrated Products Inc., USA, 2022.

[15] Analog Devices, *ADS1115 Ultra-Small, Low-Power, 16-Bit Analog-to-Digital Converter Datasheet*, Analog Devices Inc., Wilmington, MA, USA, 2023.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

АНАЛИЗ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНИЯ ДОБИВ ОТ ФОТОВОЛТАИЧНА ЦЕНТРАЛА КЪМ ЛАБОРАТОРИЯ С 7.6 „ИНТЕГРИРАНИ ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ ТЕХНОЛОГИИ“

ANALYSIS OF ELECTRICAL ENERGY GENERATION FROM A PHOTOVOLTAIC POWER PLANT FOR LABORATORY 7.6 “INTEGRATED ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES”

Stanimir Stefanov
TU- Sofia, Plovdiv branch
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"
e-mail:glasst@tu-plovdiv.bg

Abstract
The presented report examines the operation and energy production of a photovoltaic power plant connected to the grid of the Fourth Educational Building of Technical University of Sofia – Plovdiv Branch in Plovdiv. Monthly schedules of the generated electrical energy quantities are presented for a 13-month period, starting from December 2024 to December 2025. The behavior of the photovoltaic system during the winter and summer periods has been analyzed, and comparisons have been made regarding the produced quantities of electrical energy, their consistency over time, and the possibility of ensuring stability in the electrical energy supplied by the power plant.

Keywords: photovoltaic systems, power plant, green energy, laboratory, electrical.

ВЪВЕДЕНИЕ

Електроенергийната ефективността на фотоволтаичните системи обикновено се оценява на база произведената електроенергия по отношение на попадналата върху повърхността на панелите слънчева радиация, или се оценява икономически на база вложени средства и постигнати приходи[1,2,3,4,5]. Също така такава оценка може да се направи и на база използваемостта на производствения капацитет на фотоволтаичните системи, който капацитет зависи в значителна степен от метеорологичните условия в отделните периоди и дни на годината [6,7].

ИЗЛОЖЕНИЕ

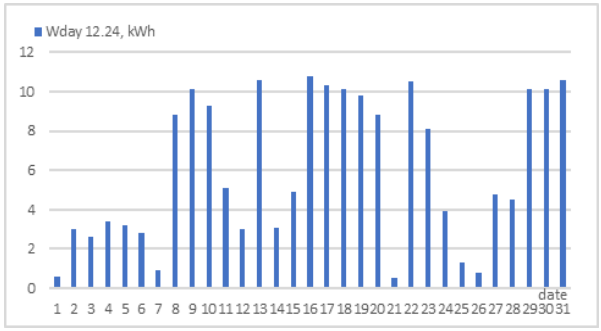
В доклада е представено изследване на производителността на фотоволтаична централа за период от тринадесет месеца, обхваща месеците от 12.2024г. до 12.2025г. включително. Фотоволтаичната централа, данните от която са обект на изследването, се намира в центъра на гр. Пловдив, Р България. Тя е разположена върху южната част покрива на 4-ти учебен корпус на ТУ – София, филиал Пловдив, хоризонтално с ориентация “изток-запад” – фиг.1. Състои се от 11 панела на фирмата SHARP ELEKTRONICS, модел NU-JD540 с мощност 540W свързани в два стринга. Инвер-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

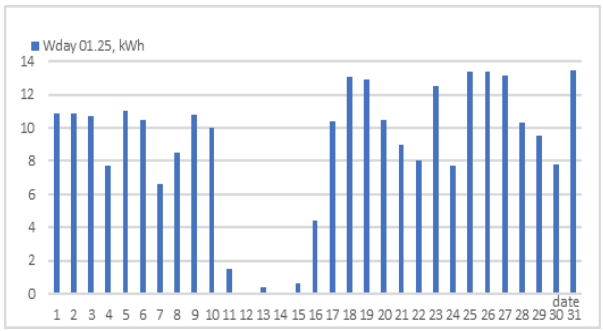
тора е модел X1-boost-SK-G4 5000VA на SolaX Power Network Technology. Коректно е да се отбележи, че след 23.06.2025г. единият стринг от централата е отпаднал, а именно 6 бр. панели, в следствие на което нейното производство е намаляло, което се вижда и от месечното производство.

***Фиг. 1**. ФЕЦ*

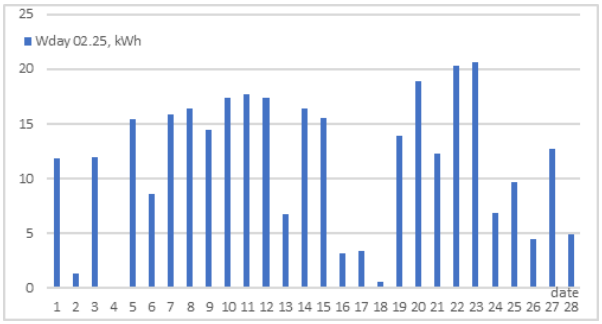
На следващите графики е представено месечното по дневно производство на електроенергия от централата.



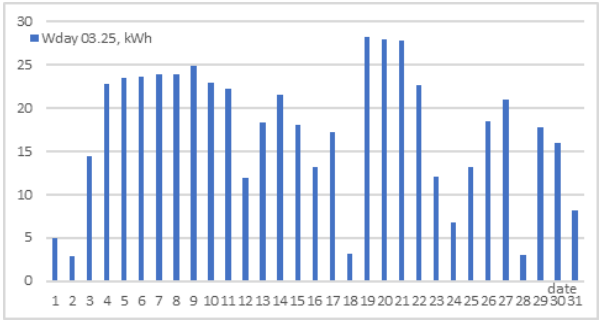
***Фиг. 2**. Дневно производство 12.2024г.*



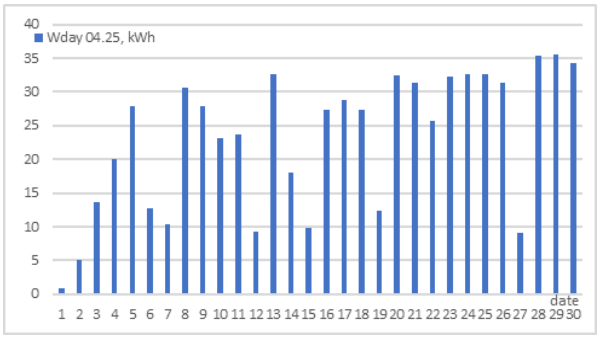
***Фиг. 3**. Дневно производство 01.2025г.*



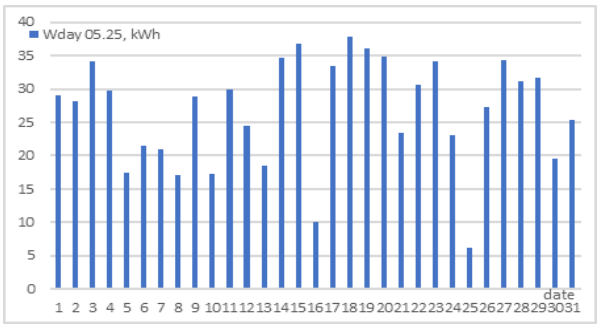
***Фиг. 4**. Дневно производство 02.2025г*



***Фиг. 5**. Дневно производство 03.2025г.*

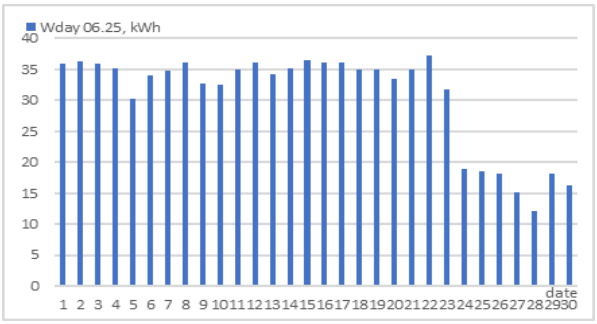


***Фиг. 6**. Дневно производство 04.2025г.*

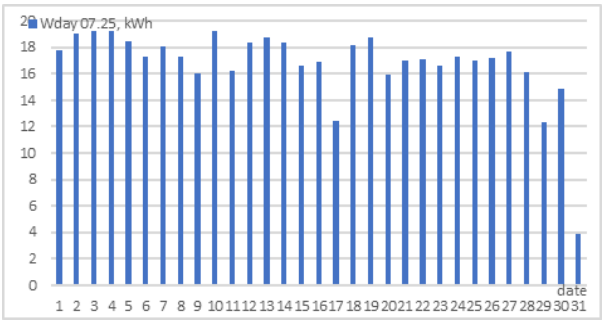


***Фиг. 7**. Дневно производство 05.2025г.*

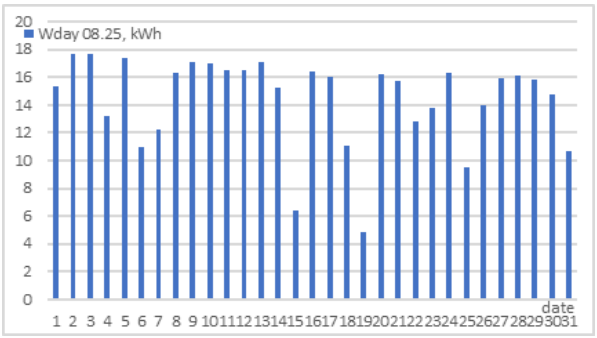
Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие



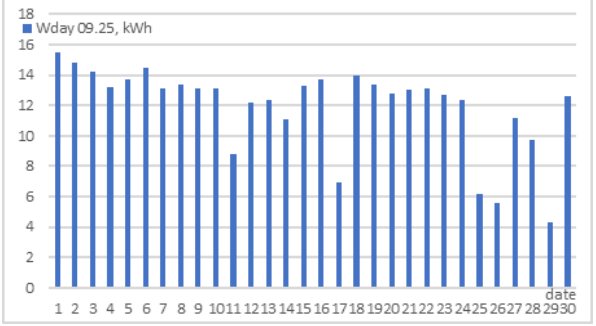
***Фиг. 8**. Дневно производство 06.2025г.*



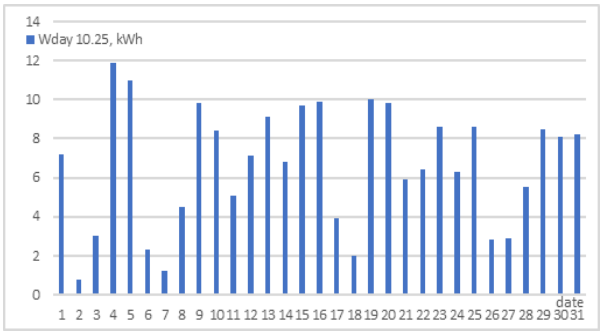
***Фиг. 9**. Дневно производство 07.2025г.*



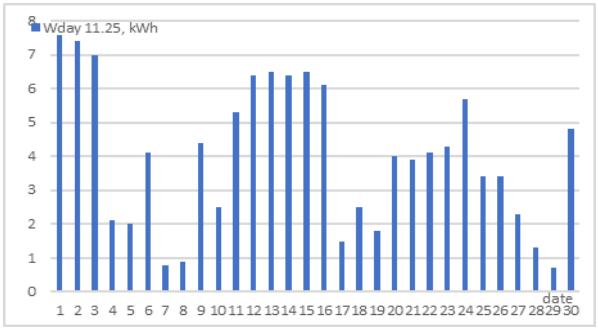
***Фиг. 10**. Дневно производство 08.2025г.*



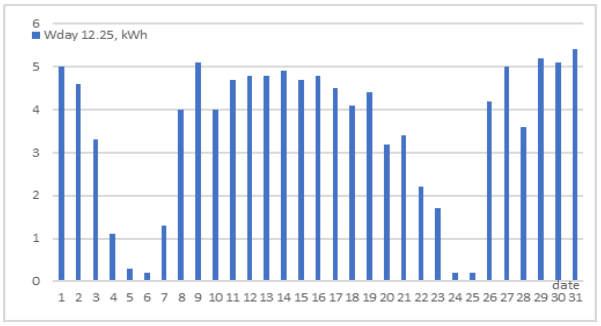
***Фиг. 11**. Дневно производство 09.2025г.*



***Фиг. 12**. Дневно производство10.2025г.*



***Фиг. 13**. Дневно производство 11.2025г.*



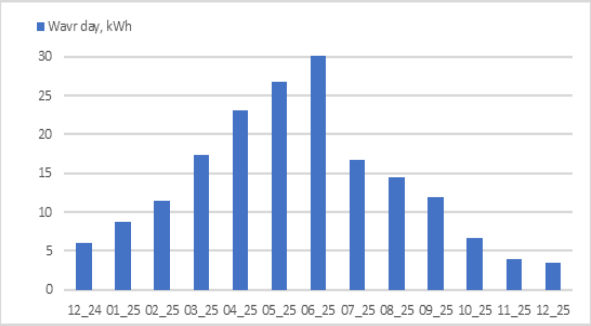
***Фиг. 14**. Дневно производство 12.2025г.*

От фигурите се вижда, че през месеците 01.2025г., 03.2025г. и 12.2025г. в зимния период имаме сравнително ниска динамика на количествата произведена през отделните дни електроенергия, като в 12.2024г. имаме един 5 дневен период с почти нулево производство на електроенергия, а през 12.2025г. имаме едно четиридневно и едно двудневно значително намаление на производството. Ако съдим от тези данни можем да направим извод, че през декемврийските месеци имаме средно

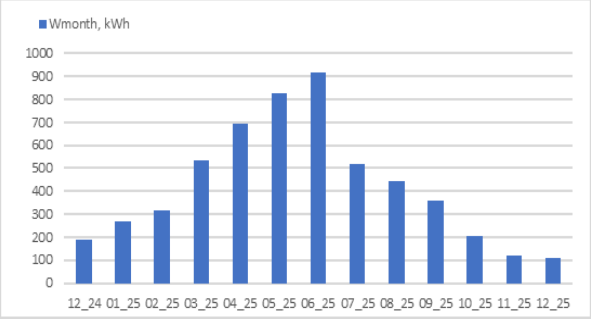
Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

6 дни в които не може да се разчита на производство на електроенергия от ФЕЦ. Най-висока динамика в производството имаме през месеците 02.2025г., 10.2025г. и 11.2025г. които са през късно зимния и есенния период, като производството на електроенергия през ноември и декември месец е почти равно, въпреки реализираните почти двойно по-високи дневни стойности в дните на производство през месец ноември. Месеците 06.2025г и 07.2025г се отличават с висока стабилност на електропроизводството, което разбира се е свързано и с постоянството в метеорологичните условия през тези два месеца.

На следващите две фигури е показано среднодневното и месечното производство по месеци за централата.



***Фиг. 15**. Среднодневна електроенергия през месеците*



***Фиг. 16**. По месечно производство на електроенергия*

От фигурите и данните свързани с тях се вижда, че през декемврийско -ноемврийския период имаме с около 5 пъти по-ниско производство отколкото през летните месеци юни и юли, като средно дневното са около 6 kWh (отчитайки за корекция и отпадналите панели). Ако приведем това количество електроенергия към продължителност на работен ден 8 часа, с тази електроенергия бихме могли да захранваме за тези 8 часа мощност от порядъка на 750W, която мощност е адекватна приблизително на 16 офисни осветителя по 48W, или приблизително осветлението на 2 лабораторни зали с площ 30m^2.

Ако разгледаме данните за юни месец, виждаме, че при работещи два стринга имаме дневно производство от порядъка на 34-36kWh, което количество разпределено за 8 часов работен ден ни дава мощност от порядъка на 4,3kW (при условие, че приемем, че производството на електроенергия е имено през тези 8 часа, което този месец е сравнително идеализирана ситуация). Стойността 4,3kW по отношение на учебния процес може да се приведе към мощността на една компютърна зала с 10 работни места.

За да имаме по добри показатели по отношение на постоянството на подаване на електроенергия от разглежданата фотоволтаична централа, към централата би било удачно да се присъедини батерия с капацитет от два пъти среднодневния за зимните месеци - 12kWh. По този начин ще можем да се възползваме от електроенергията, произвеждана в периодите извън стандартното работно време, както и да се подсигури примерно двудневно осветление на 2 лабораторни зали със зелена енергия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Когато една фотоволтаична централа работи паралелно с електроснабдяване от мрежата в общия микс е невъзможно да се разпредели коя система кои потребители захранва, но независимо от това, част от общата консумация е от фотоволтаичната система и можем условно да съпоставим

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

нейната мощност с тази на конкретни потребители – осветителни уредби, климатични системи, компютърни системи и др..

От краткия анализ и представените графики е видно, че независимо от динамиката на климатичните и метеорологичните условия, с въвеждането на системи за акумулиране на електроенергия, можем да подсигурим едни средни дневни количества електроенергия за всеки ден, които количества ще са зависими от сезона/месеца, но сравнително постоянни по стойност за седмичен или месечен период.

Благодарности

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] IRENA—International Renewable Energy Agency. 2022. Renewable Energy Statistics. Available online: https://www.irena.org (accessed on 05.02.2025)

[2] Ministry of Energy—Republic of Bulgaria. 2023. National Energy and Climate Plan. Available online: https://www.me.government.bg(accessed on 10.02.2025)

[3] Grant C. A.; Hicks A. L., Effect of manufacturing and installation location on environmental impact payback time of solar power. Springer nature, 2020, Volume 22, pp 187-196. DOI: 10.1007/s10098-019-01776-z

[4] European Commission, “Renewable Energy Directive”. Available online: https://wayback.archive-it.org/12090/20241211030528/https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en#directive-20182001eu(accessed on 22.02.2025)

[5] Matam M., Walters J. Detecting Abnormal Profiles in the Database of a PV plant Through Programmatic Comparison of Per Unit Profiles. 2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), IEEE. DOI: 10.1109/PVSC45281.2020.9300585

[6] Yalawar A., Nayak Sh., Evaluation of Performance Parameters and Economic Analysis of 1MW Grid Connected Solar PV Plant. 2018 4th International Conference for Convergence in Technology (I2CT). IEEE. DOI: 10.1109/I2CT42659.2018.9057947

[7] Sarannya C., Manoj Kumar M.V., Performance Evaluation of 50 kW Solar PV Power Plant Installed in a Technical Institution, 2021 International Conference on Communication, Control and Information Sciences. IEEE. DOI: 10.1109/ICCISc52257.2021.9484969.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

ВЛИЯНИЕ НА ТЕРМИЧНОТО СЪПРОТИВЛЕНИЕ НА ПОЧВАТА ПРИ ПОЛАГАНЕ НА ПОДЗЕМНИ СИЛОВИ КАБЕЛИ

INFLUENCE OF THERMAL RESISTANCE OF THE SOIL WHEN LAYING UNDERGROUND POWER CABLES

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

Abstract
The thermal resistivity of on-site soils plays a significant role in the design of a renewable energy facilities' electrical cabling and if not fully quantified may lead to the erroneous de-rating of cables or the unnecessary importation of cable bedding to site. It is the engineer-designer's role to quantify this parameter and recommend how best to utilize the on-site material in achieving its thermal resistivity potential. This paper presents necessary data from soil samples in order to best understand their thermal resistivity potential.
Keywords: thermal resistivity; soils, underground power cables.

ВЪВЕДЕНИЕ

Термичното съпротивление на почвите играе важна роля при проектирането на електрическите кабели на съоръжения за възобновяема енергия и ако не е напълно количествено определено, може да доведе до погрешно намаляване на номиналните характеристики на кабелите или до ненужно увеличаване на кабелна подложка на обекта [1, 2, 4]. Полагането на кабели е критичен процес за подземен монтаж, при който слой защитен, финозърнест материал (обикновено пясък или пресята почва) се поставя на дъното на изкопа преди полагането на кабела и около него след това, за да осигури механична защита и правилно разсейване на топлината [5, 8,].

При протичане на електрически ток в проводник се генерира топлина. Съпротивлението на топлинния поток между кабела и околната среда води до повишаване на температурата на кабела. Умерените повишения на температурата са в диапазона, за който е проектиран кабелът, но температурите над проектната температура съкращават живота на кабела. Тъй като почвата е в пътя на топлинния поток между кабела и околната среда (и следователно е част от топлинното съпротивление), топлинните свойства на почвата са важна част от цялостния проект. Подробните изчисления, необходими за правилното проектиране на подземна кабелна система, са известни от над 60 години. Обикновено използваните процедури са описани в Neher и McGrath (1957) [6] и по-скоро от Международната електротехническа комисия (1982) [5]. Изчисленията са доста подробни и обикновено се основават на солидна физика или добър емпиризъм, докато не се стигне до почвата. Тогава избраните числа често са почти изстрел в тъмното. Тъй като дори в добре проектирана система почвата може да представлява по-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

ловината или повече от общото термично съпротивление, инженерите трябва да подхождат отговорно при изчисленията.

ИЗЛОЖЕНИЕ

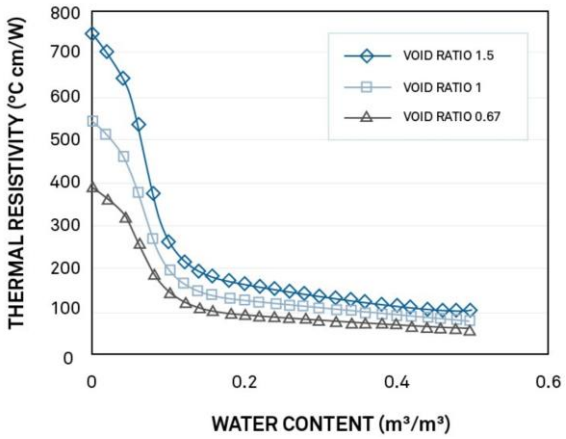
Модел и подходи за определяне на съпротивление на почвата, съществуват отдавна (de Vries, 1963; Campbell and Norman, 1998). Тези модели се основават на модели на диелектрично смесване и третират общото съпротивление като претеглена паралелна комбинация от съпротивленията на съставните компоненти. Пет основни компонента са важни при определяне на термичното съпротивление на почвата. Това са кварц, други почвени минерали, вода, органична материя и въздух, подредени по нарастващ ред на съпротивлението. Стойностите на термичното съпротивление за тези материали са съответно 0,1, 0,4, 1,7, 4,0 и 40 m C/W.

Без да са известни тегловните коефициенти за тези компоненти в почвата или пълнежен материал, четири неща трябва да съобразяват:

1. Уплътняването на почвения слой, влизащ в досег с кабела трябва да е максимално, за да се сведе до минимум въздушното пространство и да се постигнат приемливо ниски термични съпротивления.
2. Заместването на въздуха с вода помага намаляване на термичното съпротивление, но водата все още не е много добър проводник.
3. Органичната материя, независимо колко е влажна, все пак има много високо съпротивление.
4. Материалите за запълване с високо съдържание на кварц ще имат най-ниско съпротивление, при равни други условия.

Плътност на почвата и термично съпротивление.

Фигура 1 показва зависимостта на уплътняването за постигане на приемливо ниско термично съпротивление в материалите за запълване. Стойност, която често се приема за термично съпротивление на почвата при изчисления на заровени кабели, е 0,9 m^0C/W. Нито една от кривите на Фиг. 1 не достига тази стойност, дори при много висока плътност. Типичната плътност за полева почва, която може да поддържа растежа на растенията, е около 1,5 mg/m^3. При тази плътност дори кварцовата почва има съпротивление повече от 4 пъти по-голямо от приетата стойност.



***Фиг. 1**. Влияние на плътността и водното съдържание върху термичното съпротивление на глинеста почва. Обемните плътности са 1,06 mg/m^3 за коефициент на порьозност 1,5, 1,33 mg/m^3 за коефициент на порьозност 1 и 1,59 $mg/^3$ за коефициент на порьозност 0,67.*

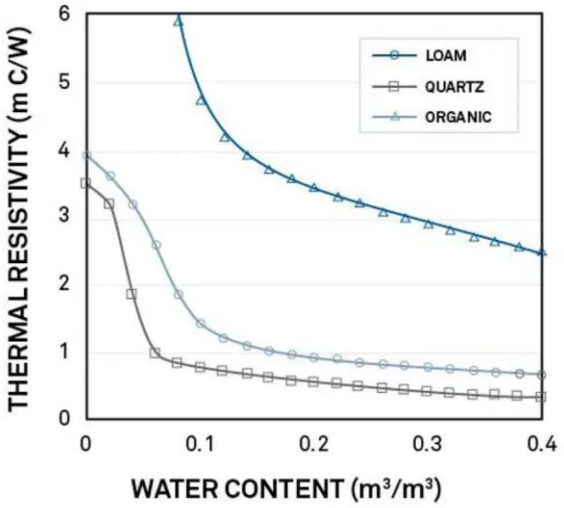
От Фиг. 1 могат да се направят три важни наблюдения.

- органичният материал никога не е подходящ за разсейване на топлината от заровен кабел, независимо колко е плътен.
- термичното съпротивление на сухи, гранулирани материали, дори когато са уплътнени до изключителна плътност, не е идеално за засипване с кабели.
- въздушните пространства контролират потока на топлина, така че въпреки че кварцовите минерали

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

имат четири пъти по-ниско съпротивление от глинестите минерали, общото съпротивление на двата материала е сходно при сходна плътност.

Струва си да се отбележи, че произволно високи плътности не са постижими само чрез уплътняване. Частиците с еднакъв размер се уплътняват до дадена максимална плътност. За да се постигнат плътности над тази, без да се смачкват частиците, по-малки частици се добавят към кухините между по-големите частици. Следователно най-високи плътности се постигат чрез използване на добре сортирани материали.



***Фиг. 2**. Добавянето на вода към порест материал съществено намалява неговата термична устойчивост*

Водно съдържание и термично съпротивление

Въпреки че водосъдържанието е по-високо от това на почвените минерали, то все пак е много по-ниско от това на въздуха. Ако порестите пространства в почвата са запълнени с вода, а не с въздух, съпротивлението намалява. Фигура 2 показва ефекта на водата. Плътността е около 1,6 mg/m^3, много по-ниска от най-високите стойности на Фигура 1, но с малко вода съпротивленията са доста под 1 m C/W. Сега, с повече вода в порите, ефектът на кварца е по-изразен. Съпротивлението на органичната почва, макар и по-добро, отколкото когато е суха, все още е твърде високо, за да осигури разумно разсейване на топлината за заровен кабел.

Съдържание на вода в полето

Тъй като термичното съпротивление варира толкова много в зависимост от съдържанието на вода, а съдържанието на вода в почвата е толкова променливо, разумно е да се запитаме какво съдържание на вода да очакваме в полевите почви. Под и дори малко над нивото на подземните води почвата е наситена (всички пори са запълнени с вода). В тези ситуации може да се гарантира, че съпротивленията ще останат на възможно най-ниските стойности за тази плътност на почвата. Минималното съдържание на вода в кореновата зона на растящите растения обикновено варира от 0,05 m^3/m^3 в пясъци до 0,1 или 0,15 m^3/m^3 за почви с по-фина текстура. Това съдържание на вода съответства приблизително на съдържанието на вода на Фиг. 2, при което съпротивлението започва да се увеличава драстично. Това понякога се нарича критично съдържание на вода и е съдържанието на вода, под което термично задвижваният поток от пари в температурен градиент няма да бъде възстановен от връщащия се поток на течност през почвените пори. Тази точка е много важна при проектирането на заровени кабели, защото когато почвата около кабела стане толкова суха, топлината на кабела ще изтласка влагата, изсушавайки почвата около кабела и увеличавайки неговото съпротивление. Това води до допълнително нагряване, което отвежда допълнителната влага. Може да се получи термично неконтролируемо изтичане.

Специална засипка

По-ниски съпротивления на сухо от показаните на Фиг. 1 могат да се постигнат с помощта на специално разработени ма-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

териали за засипка. На място може да се излее специална флуидизирана термична засипка. Тя има съпротивление на сухо около 0,75 m C^0/W, което намалява под 0,5 m C^0/W, когато е мокра.

Методи за измерване на термичното съпротивление

Въпреки че е възможно да се изчислят топлинните свойства на почвата от физични свойства, обикновено е по-лесно да се измерят директно, отколкото да се правят изчисления. Методите са дадени от ASTM(2000) и IEEE(1992) [1]. Приетият метод използва линеен източник на топлина. Обикновено нагревателен проводник и температурен сензор се поставят вътре в малка хиподермична иглена тръба с дължина около 30 пъти диаметъра ѝ. Температурата се следи, докато иглата се нагрява. В тази радиална система на топлинен поток се установява стационарно състояние и може да се начертае график на температурата спрямо логаритмичното време, за да се получи праволинейна зависимост. Термичното съпротивление е право пропорционално на наклона на линията. Няколко компании предлагат инструменти, подходящи за полеви или лабораторни измервания на топлинно съпротивление, а сонди могат да бъдат оставени на място, за да се наблюдават топлинните свойства, след като кабелът е инсталиран и е в употреба. Специфични за обекта съображения В допълнение към обсъдените по-горе проблеми, има няколко специфични за обекта проблеми, които трябва да се вземат предвид при проектирането и изпълнението на подземни инсталации на захранващи кабели. Те включват анализ на компромиса между дълбочината на инсталиране, разходите за инсталиране и термичната стабилизация. Колкото по-дълбоко се заравят кабелите, толкова по-стабилна е топлинната среда. Това е особено вярно, ако плитките подземни води и капилярният възходящ поток водят до относително влажни условия около кабелите. Повърхностните условия също ще повлияят на обмена на вода и енергия между почвата и атмосферата и в резултат на това на топлинната среда около кабелите. В градовете повърхността най-вероятно ще бъде покрита с пътища, сгради, паркове или градини, докато в селските райони голата почва или растителната покривка ще бъдат най-често срещани. Важно е да се вземе предвид състоянието на повърхността и неговото въздействие върху подлежащата топлинна среда: особено всяка промяна в състоянието на повърхността, която би могла да доведе до нежелани последици. Добавянето на растителност, например, може да доведе до значително изсушаване на почвата с потенциални последици, както беше обсъдено по-рано. Глинестите почви по-специално могат да се напукат при изсъхване, което води до образуване на въздушни празнини около кабелите. Трябва да се положат всички усилия, за да се избегне това. Потенциалните „горещи точки“ по трасето на кабела (като зони с добре дренирани песъчливи почви или растителни площи, които биха могли да доведат до значително изсушаване на почвата) трябва да получат специално внимание, за да се гарантира дългосрочният успех на всяка инсталация.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Има пет важни точки, които трябва да се посочат, като следствие от изложението по-горе:

1. Топлинните свойства на почвата и засипката трябва да бъдат известни за безопасно и успешно инсталиране на подземни захранващи кабели. Не бива да се приема априори термично съпротивление на почвата при изчисления на заровени кабели да е 0,9 m^0C/W.

2. Плътността и водното съдържание играят важна роля при определянето на топлинното съпротивление. Необходимо е определяне плътността на засипващия ма-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

териал проверка чрез проектиране и подходящо управление, че водното съдържание не може да падне под критичното ниво.

3. Естествените почви, които поддържат растежа на растенията, винаги имат много по-високи съпротивления от инженерните материали поради по-ниската им плътност и променливото, но понякога ниско, водно съдържание.

4. Налични са инженерни засипващи материали, които могат да осигурят адекватни топлинни характеристики при всякакви условия.

5. Измерването на топлопроводността, както на място, така и в лаборатория, е сравнително лесно и трябва да бъде част от всеки проект за проектиране и инсталиране на кабели.

6. Съществуват няколко специфични за обекта параметри, като дълбочината на полагане на кабела, управлението на растителността и почвените води, както и избягването на прекомерно изсушаване и напукване на почвата, които биха могли да доведат до въздушни междини, всички от които трябва да се вземат предвид при проектирането и изпълнението на подземни инсталации на захранващи кабели.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] Standard, A. S. T. M. “D 5334-92: Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure.” ASTM Standards on DISC 4 (2000).

[2] Campbell, Gaylon S., and John M. Norman. An Introduction to Environmental Biophysics. Springer Science & Business Media, 2012. Book link.

[3] DeVries, D. A. “Thermal Properties of Soils. In ‘Physics of Plant Environment’.(Ed. WR van Wijk) pp. 210–235.” (1963).

[4] IEEE (1992) Guide for Soil Thermal Resistivity Measurements. Inst. of Electrical and Electronics Engineers, Inc. New York. Article link.

[5] International Electrotechnical Commission (1982) Calculation of Continuous Current Ratings of Cables. Publication 287, 2nd ed. Article link.

[6] Neher, J. H. and M. H. McGrath. (1957) The Calculation of Temperature Rise and Load Capability of Cable Systems. AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. 76. Article link.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗМЕРВАНЕ ТЕРМИЧНОТО СЪПРОТИВЛЕНИЕ НА ПОЧВАТА ПРИ ПОЛАГАНЕ НА ПОДЗЕМНИ СИЛОВИ КАБЕЛИ ЗА ФОТОВОЛТАИЧНА ЦЕНТРАЛА

RESULTS OF MEASUREMENT OF THE THERMAL RESISTANCE OF THE SOIL WHEN LAYING UNDERGROUND POWER CABLES FOR A PHOTOVOLTAIC POWER PLANT

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

Abstract

The thermal resistivity of on-site soils plays a significant role in the design of a renewable energy facilities' electrical cabling and if not fully quantified may lead to the erroneous de-rating of cables or the unnecessary importation of cable bedding to site. It is the engineer-designer's role to quantify this parameter and recommend how best to utilize the on-site material in achieving its thermal resistivity potential. This paper presents necessary data from soil samples in order to best understand their thermal resistivity potential.

Keywords: thermal resistivity; soils, underground power cables.

ВЪВЕДЕНИЕ

Оразмеряването на електрически кабели е критичен процес за осигуряване на безопасност, ефективност и дълготрайност на електрическите инсталации. Основният фактор, който определя избора на сечение, е топлопроводността и допустимото загряване на кабела от протичащия ток. [1, 2]. Едно от ключовите условия за оразмеряване е начинът на полагане (в стена, в тръба, във въздуха, в земята), който влияе на охлаждането. При изграждането на фотоволтаични централи, начина най-често се използва подземно полагане на електрическите кабели. Допустимото токово натоварване на преносния кабел е ограничено от максимално допустимата температура на кабела, както и от заобикалящата го почва и земна подложка. Ясно е, че електрическите преносни кабели, които могат да пренасят по-голям ток, са по-икономични за енергийно-производствено съоръжение, което може да има над километри подземни кабели. За да се избегне ненужно намаляване на номиналните стойности и последваща токоносимост на преносните кабели, проектантът трябва да познава термичното съпротивление на подложката, която ще се използва за проекта [3, 4]. По-ниското термично съпротивление на кабелната подложка и, което е важно, способността на почвата да задържа това термично съпротивление при ниско съдържание на влага играят основна роля в проектирането и цената на електрическите преносни кабели за всеки електрически инфраструктурен проект.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Термичното съпротивление на почвите на място играе важна роля при проектирането на електрическите кабели на съоръжения за възобновяема енергия и ако не е напълно количествено определено, това може да доведе до погрешно намаляване на номиналните характеристики на кабелите или до ненужно внасяне на кабелна подложка на обекта.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Методите с преходни линейни източници на топлина се използват за измерване на топлопроводимостта на порести материали от над 60 години. Обикновено сондата за това измерване се състои от игла с нагревател и температурен сензор вътре. Пропуска се електрически ток през нагревателя и системата следи температурата на сензора с течение на времето. Анализът на зависимостта на температурата на сензора от времето, когато сондата е в теставния материал, определя топлопроводимостта [2, 3, 4, 5]. Съществуват и конструкции, при които нагревателят и температурните сензори са поставени в отделни игли. При сензора с двойна сонда анализът на зависимостта температура-време за отделните сонди дава информация за дифузионността и топлинния капацитет, както и за проводимостта.

Идеалният сензор има много малък диаметър и е приблизително 100 пъти по-дълъг от своя диаметър. Сензорът е в тесен контакт с околния материал и измерва температурата на материала по време на нагряване и охлаждане. В идеалния случай температурата и съставът на въпросния материал не биха се променяли по време на измерването. Реалните сензори не отговарят на тези изисквания, по няколко причини:

- Малките идеални сензори, биха били твърде крехки и чупливи за повечето практически приложения.
- Измерванията във външна среда включват променящи се температури; околната температура обикновено не е постоянна.
- Нагряването на влажни и ненаситени порести материали предизвиква водата да се отдалечава от източника на топлина, променяйки водо-съдържанието в областта на измерване.
- Отворът, направен за сондата, често променя структурата на материала около него, създавайки контактно съпротивление между сензора и материала.

Проектирането на сензор, който дава точни измервания при всякакви условия, е предизвикателство поради следните причини:

- Ако сензорът е твърде малък, той е крехък и контактното съпротивление може да бъде високо в сухи, порести материали.
- Големите сензори изискват дълго време за нагряване, което може да промени показанията, като отблъсне водата от сензора и може да причини свободна конвекция в течни проби, което променя показанията.
- Високата скорост на нагряване прави температурните промени по-лесни за отчитане и по-малко податливи на грешки от температурен дрейф, но също така води до движение на водата извън зоната на измерване и свободна конвекция в течности. Поради това се препоръчват дълги времена за нагряване, за да се минимизира контактното съпротивление, но те водят до движение на водата далеч от сензора.

Съвременните сензори, като тези на TEMPOS METER се изпълняват тези изисквания относно измерванията на термичните свойства по отношение на тези проблеми.

При изпълнение на проект за фотоволтаичен парк с мощност над 200 MW и инсталиране около 400 000 фотоволтаични панела е поставено изискване да се направят измервания на термичната проводи-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

мост на почвата по трасето на соларните кабели.

На фиг. 1 е показан терена, където е разположен фотоволтаичния парк.

***Фиг. 1**. Снимка на изследвания терен.*

Измерването се извършва в съответствие с ASTM D5334-14 - Стандартен метод за определяне на топлопроводимостта на почва и скала чрез процедура с термична иглена сонда. Този начин на измерване представя процедура за определяне на топлопроводимостта на почва и мека скала, използвайки метод на преходно нагряване. Начина на измерване е приложим както за непосредствено измерване на място, така и за реконструирани почвени образци и образци от мека скала.

Методът се състои в измерване на термичното съпротивление на материалите посредством метална сонда с форма на игла, която се нагрява чрез прилагане на електрически ток за определен период от време. С термодвойка се измерва температурната промяна, която тя претърпява с течение на времето, и чрез математически изрази термичното съпротивление се получава за няколко минути.

За определяне на термичните свойства са използвани едноиглови сензори тип KS-3 и анализатор на термични свойства METER TEMPOS, с възможност за получаване на непрекъснат запис. За калибриране на термичните сензори е използван компонент на основата на глицерин, доставен от производителя.

***Табл. 1.** Измервания от 1 до 8 изкоп*

	Test Depth	Conductivity K W/(m • K)	Resistivity R °C • cm/W	Tempetature °C
№ T1	0.5 m	0,9562	1,05	9,6
	1 m	1,093	0,915	8,4
	1.5 m	1,401	0,714	8,4
№T2	0.5 m	0,7316	1,37	8,9
	1 m	0,951	1,05	8,7
	1.5 m	0,9865	1,01	7,6
№T3	0.5 m	1,072	0,933	6,2
	1 m	0,8748	1,14	6,6
	1.5 m	0,7728	1,29	6,5
№T4	0.5 m	1,045	0,957	6,2
	1 m	0,7705	1,3	5,8
	1.5 m	0,8947	1,12	5,5
№T5	0.5 m	1,077	0,929	6,1
	1 m	1,01	0,99	6,2
	1.5 m	0,6009	1,66	6,3
№T6	0.5 m	1,153	0,867	7,3
	1 m	0,8254	1,21	7,3
	1.5 m	0,8061	1,24	7,2
№ T7	0.5 m	0,9878	1,01	10,3
	1 m	1,136	0,88	10,1
	1.5 m	0,8959	1,12	10,4
№ T8	0.5 m	1,104	0,905	9,6
	1 m	0,8657	1,16	9,2
	1.5 m	0,9114	1,1	8,6

Общо 48 теста за термично съпротивление са проведени на място, в 16 изкопа на дълбочини 0.5, 1.0 и 1.0 m – фиг. 2. Измерванията са извършени март 2023 г.

Представените резултати съответстват на данни, получени в глобален мащаб. Термичното съпротивление има вариращa в дълбочина средна стойност, представена в следнати таблици – 1 и 2:

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Табл. 2. *Измервания от 9 до 16 изкоп*

	Test Depth	Conductivity K W/(m • K)	Resistivity R °C • cm/W	Temperature °C
№ T9	0.5 m	1,173	0,853	9,1
	1 m	1,045	0,957	8,4
	1.5 m	0,797	1,3	7,7
№ T10	0.5 m	0,9815	1,02	9,4
	1 m	0,7149	1,4	9
	1.5 m	0,6723	1,49	8,6
№ T11	0.5 m	0,8498	1,18	6,8
	1 m	1,081	0,925	6,8
	1.5 m	0,7899	1,27	6,7
№ T12	0.5 m	1,215	0,823	9,1
	1 m	1,163	0,86	8,8
	1.5 m	0,9364	1,07	8,4
№ T13	0.5 m	1,265	0,79	9,6
	1 m	0,7944	1,26	8,7
	1.5 m	0,5353	1,87	8,3
№ T14	0.5 m	0,9398	1,06	6,6
	1 m	1,167	0,857	6,8
	1.5 m	0,7326	1,36	6,8
№ T15	0.5 m	1,087	0,92	7,5
	1 m	0,5174	1,93	7,3
	1.5 m	0,6353	1,57	7,2
№ T16	0.5 m	0,951	1,05	10,8
	1 m	0,994	1,01	9,6
	1.5 m	0,7523	1,33	9,4

Фиг. 2*. Измервателната апаратура на терен.*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Направените измервания на термичната проводимост на почвата на терена, определен за полагане на електрическите кабели доказват, че реалните стойности се различават от често приеманата теоретична стойност от 0.9 KW/(mK). Препоръчително е при всеки проект за подземно полагане на кабели да се правят подробни измервания на термичните свойства на почвата и засипките около кабела. Реално измерените данни следва да се използват за оразмеряване сечението на електрическите проводници.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] Blackwell, JHl. "A transient-flow method for determination of thermal constants of insulating materials in bulk part I—Theory." Journal of applied physics 25, no. 2 (1954): 137-144.

[2] Bristow, Keith L., Ronald D. White, and Gerard J. Kluitenberg. "Comparison of single and dual probes for measuring soil thermal properties with transient heating." Soil Research 32, no. 3 (1994): 447-464.

[3] Carslaw, H. S., and J. C. Jaeger. Conduction of heat in solids: Oxford Science Publications. Oxford, England, 1959.

[4] Kluitenberg, G. J., J. M. Ham, and Keith L. Bristow. "Error analysis of the heat pulse method for measuring soil volumetric heat capacity." Soil Science Society of America Journal 57, no. 6 (1993): 1444-1451.

[5] Knight, John H., Gerard J. Kluitenberg, Tamir Kamai, and Jan W. Hopmans. "Semianalytical solution for dual-probe heat-pulse applications that accounts for probe radius and heat capacity." Vadose Zone Journal 11, no. 2 (2012).

[6] Shiozawa, Sho, and Gaylon S. Campbell. "Soil thermal conductivity." Remote Sensing Reviews 5, no. 1 (1990): 301-310.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

ЕФЕКТ НА ПОЛИГЛИЦЕРИЛ ЕСТЕРИ ВЪРХУ РЕОЛОГИЯТА НА НИШКОВИДНИ МИЦЕЛАРНИ РАЗТВОРИ

EFFECT OF POLYGLYCERYL ESTERS ON THE RHEOLOGY OF WORMLIKE MICELLAR SOLUTIONS

Gergana Georgieva[1], Rumyana Stanimirova[1,2], Krassimir Danov[1,2], Jordan Petkov[2,3,4]

[1]*Department of Chemical & Pharmaceutical Engineering, Faculty of Chemistry & Pharmacy, Sofia University “St. Kliment Ohridski”, 1164 Sofia, Bulgaria*
[2]*Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"*
[3] *Arxada, Hexagon Tower, Crumpsall Vale, Blackley, Greater Manchester, Manchester M9 8GQ, UK*
[4] *Biological Physics, School of Physics and Astronomy, The University of Manchester, Schuster Building,Oxford Road, Manchester M13 9PL, UK*

Abstract
The polyglycerol esters (PGEs) are nonionic functional ingredients derived from polyglycerol and fatty acids from renewable sources. The rheology of binary wormlike micellar solutions of ionic and zwitterionic surfactants depends significantly on the added inorganic salt. We study the effect of three types of polyglycerol esters added to salt free wormlike micellar solutions on the modification of their rheological properties. Two different rheological regimes (shear rate sweep and frequency sweep) are applied to characterize the shear rheology. The experimental data are processed using the Cates model (Poisson renewal model) to obtain the characteristic relaxation, breaking and reptation times and the shear moduli. P3-1-S, with one stearate chain and three polyglycerol units, shows a strong thickening effect on the rheology. P6-2-S, with six polyglycerol units and two stearate chains, has an intermediate effect on the increase of the apparent viscosity of salt free wormlike solutions. In contrast, the well water-soluble P10-1-L, with ten polyglycerol units and one laurate chain, acts as an effective thinning agent. The obtained results could be applied for the fine tuning of the apparent viscosity of salt free products based on the ternary mixtures of ionic and zwitterionic surfactants and PGEs.

Keywords: polyglycerol esters; wormlike micellar solutions; zero-shear viscosity; relaxation, breaking and reptation times; shear modulus and elasticity.

INTRODUCTION

The wormlike micellar solutions find wide applications in the formulations for personal care and house-hold detergency [1,2] and they are used in drug delivery, oilfield industry, and turbulent drag-reduction [3,4]. For practical applications, the wormlike micellar solutions (WMSs) are convenient because their rheological properties (viscosity and elasticity) can be adjusted over a wide range by tuning the salt, co-surfactant, perfumes, etc. concentrations [5]. For example, the increase of the added salt concentration in mixed ionic and zwitterionic micellar surfactant solution leads to formation of giant wormlike and branched micelles, which eventually assemble into a multiconnected micellar network that represents a supergiant

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

micelle. The addition of salt is undesired for a wide number of industrial applications. In this case, the fine tuning of the rheological behavior can be achieved by using co-surfactants, e. g. polyglycerol esters (PGEs).

The molecules of polyglycerol esters (PGE) can contain different numbers of hydrophilic polyglycerol units and hydrophobic fatty acid segments. PGEs are characterized by good biocompatibility, biodegradability, and low toxicity. Depending on the ratio between their hydrophilic and hydrophobic parts, PGEs can be water- or oil-soluble or partially soluble in both phases. As a result, the effect of PGEs on the self-assembly in and on the rheology of ternary wormlike micellar solutions (WMSs) with ionic and zwitterionic surfactants is complex.

At very low shear strains and rates of strains, the rheological behavior of WMSs is typically described by the Maxwell model of viscoelastic body with constant shear elasticity G_M, zero-shear viscosity η_0, and relaxation time $\tau_R = \eta_0/G_M$. The increase of shear deformation leads to considerable deviations from the Maxwell model and the rheological properties of the WMS are described by the Poisson renewal model (PRM) or alternatively by the shuffling model (SFM) [6].

Here, we investigate the effect of three types of PGEs on the shear rheology of mixed ionic and zwitterionic wormlike micellar solutions. The used different rheological regimes (apparent viscosity vs rate of shear strain and oscillatory experiments at different frequencies) gave possibility to characterize the dependencies of the main physicochemical parameters (elasticities, characteristic times, and the shear moduli) on the concentration of added PGEs. The effect of the number and type of chains and the polyglycerol units on the thickening or thinning performance of PGEs is discussed. The obtained results provide insight into how the PGEs can be used for a fine tuning of the viscosity of wormlike micellar solutions of practical interest.

MATERIALS AND METHODS

We studied the effects of three polyglycerol esters of fatty acids with different degrees of polymerization and chains, supplied by Arxada (Manchester, UK). The headgroup sizes in the studied polyglycerol esters are distributed around a mean value. The specific polyglycerol esters were as follows: Geomulse™ S8 RSPO MB Pastille (P6-2-S) is a polyglyceryl-6 di-stearate ester; Syneth™ S7 K RSPO MB Pastille (P3-1-S) is a polyglyceryl-3 mono-stearate ester; Geomulse™ L15 RSPO MB (P10-1-L) is polyglyceryl-10 mono-laurate ester.

The basic wormlike micellar solution of 10 wt% contains 3 wt% sodium lauryl ether sulfate with 1 ethylene oxide group (SLES, a product of Stepan with a trade name of STEOL CS170, active substance 70%) and 7 wt% cocamidopropyl betaine (CAPB, a product of Evonik, Essen, Germany, Tego Betain F 50, active substance 37.8%). All surfactant samples were used as received without further purification.

The basic surfactant solution (CAPB + SLES) was prepared in a reaction bottle at room temperature with deionized water purified by the Elix 3 water purification system (Millipore). Subsequently, the necessary amount of PGEs was dissolved in the mixed micelles by vigorous agitation on a temperature-controlled magnetic stirrer at 70 °C for at least 1.5 hours. To reach chemical equilibrium, we kept the resulting three-component mixture in a thermostat at 25 °C for 24 hours.

Rotational rheometer Bohlin-Gemini equipped with cone-plate geometry was used to measure the rheological response of the micellar solutions. For $\eta_0 < 40$ Pa·s, we used a cone with diameter of 60 mm and a cone angle of 2° (the gap distance was 70 μm). For larger viscosities, we switched to a cone with diameter of 40 mm and a cone angle of 4°

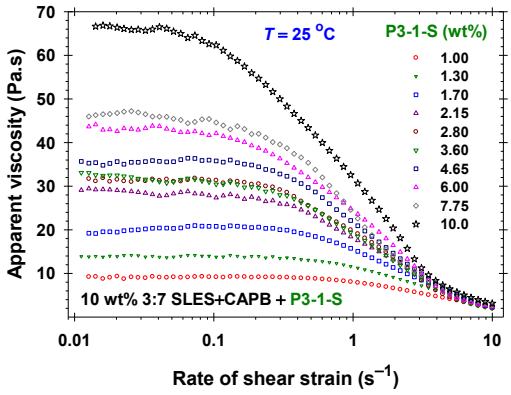
Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

(the gap distance was 150 μm). The temperature, T =25±0.1 °C, was controlled by a Peltier element. The evaporation was suppressed by a solvent trap.

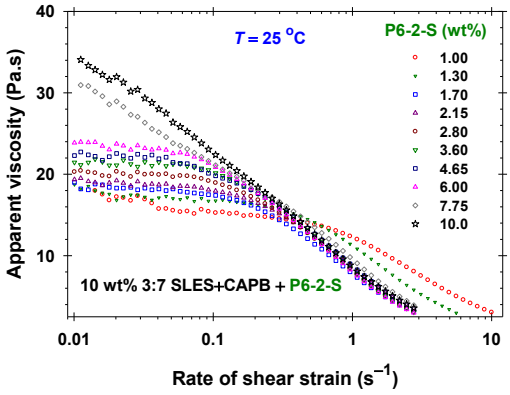
Two rheological regimes were applied to characterize the shear rheology of the studied solutions. First, we measured the apparent viscosity, η_{app} (the ratio between the steady shear stress and the rate of shear strain). The steady shear rate sweeps were performed in the shear rate range from 0.01 to 10 s^{-1}. The rheometer automatically adjusted the acquisition time at each point to ensure steady-state conditions. The storage and loss moduli, G' and G'', as functions of the angular frequency, ω, in the range from 0.06 to 100 rad/s at a small amplitude of the shear strain (2%) were obtained using the frequency sweep oscillatory regime. We checked the linear rheological response of all micellar solutions – the obtained moduli were independent on the amplitude of the shear strain up to 10% over the studied frequency range.

EXPERIMENTAL RESULTS AND RHEOLOGICAL PARAMETERS

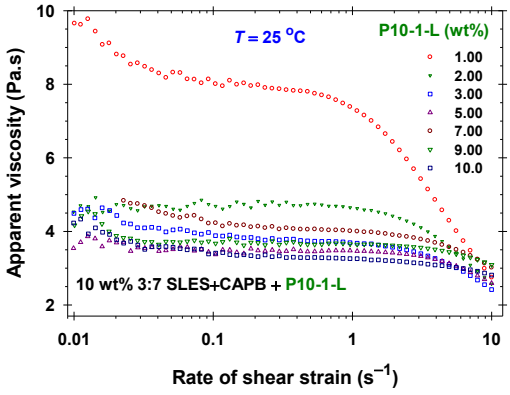
Shear rate sweep regime. Fig. 1 summarizes the experimental data for the apparent viscosity, η_{app}, vs the rate of shear strain, $d\gamma/dt$, in the case of 10 wt% 3:7 SLES+CAPB micellar solutions in the presence of different PGE concentrations. The addition up to 10 wt% PGE to the basic solution changes the magnitude of the rheological response but not the typical shape of the flow curves [5,6]. For low values of the shear rate, the quasi-Newtonian regime with the approximately constant apparent viscosity is measured, which is followed by the well pronounced shear thinning (decrease of the apparent viscosity with the increase of $d\gamma/dt$). In the presence of P3-1-S and P6-2-S (Figs. 1A and 1B), the range of the quasi-Newtonian regime decreases with the rise of the shear rate. Note that the addition of 7.75 and 10 wt% of P6-2-S to the basic solution (Fig. 1B) suppresses the Newtonian regime and the micellar solutions obey the shear thinning rheological behavior for all studied values of $d\gamma/dt$. In contrast, the addition of P10-1-L leads to the decrease of the apparent viscosity and the extension of the range of the quasi-Newtonian behavior (Fig. 1C).



(A)



(B)



(C)

Fig. 1. *Apparent viscosity vs shear rate for 10 wt% 3:7 SLES+CAPB micellar solutions in the presence of different concentrations of added: A) P3-1-S; B) P6-2-S; C) P10-1-L.*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

The experimental results summarized in Fig. 1C shows that the water soluble P10-1-L acts as an effective thinning agent because of the bulky surfactant heads, which suppresses the growth of the wormlike micelles. In the presence of 2 wt% P10-1-L, the system has apparent viscosity of 5 Pa·s up to 4 s^{-1} rate of shear strain. For larger concentrations of P10-1-L, the viscosity of the ternary micellar solutions remains constant of about 4 Pa·s.

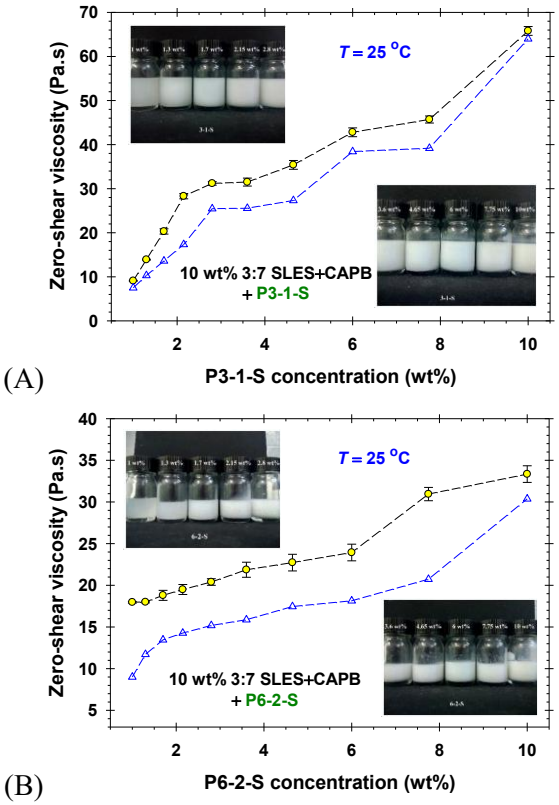


***Fig. 2**. Zero-shear viscosity of ternary micellar solutions (10 wt% 3:7 SLES+CAPB in the presence of PGEs) vs added PGE concentrations: A) P3-1-S; B) P6-2-S.*

The effect of added P3-1-S and P6-2-S to the basic system of 10 wt% 3:7 SLES+CAPB on the zero-shear viscosity is shown in Figs. 2A and 2B, respectively. Symbols o correspond to the zero-shear viscosities (Figs. 1A and 1B); for 7.75 and 10 wt% P6-3-2 (Fig. 1B), the respective symbols show the apparent viscosity measured for shear rate of 0.01 s^{-1}. Symbols Δ illustrates the hypothetical values of the Maxwellian viscosity, η_0. One sees thar P3-1-S is an effective additive to increase the bulk viscosity of the basic system. The molecules of P3-1-S are well packed in the mixed micelles and favor the growth of wormlike micellar structures. P6-2-S is less effective thickener, which is operative for concentration below 6 wt%. For P6-2-S concentrations above 6 wt%, the apparent viscosity is high (up to 30 Pa·s) but there is no pronounced quasi-Newtonian behavior. Because of the two times greater number of glycerol units compared to P3-1-S, the P6-2-S molecules cannot promote the strong growth of the mixed wormlike micelles.

Oscillatory regime. The Maxwell model of viscoelastic body fails down for the studied systems. For the data processing of oscillatory experiments, we applied the original Cates model [6,7] known as the Poisson renewal model (PRM). The model accounts for the curvilinear diffusion of linear molecules confined by their neighbors (reptation), the micelle reversible scission and end-interchange processes, and the shear modulus of the WMS, G_e. The process of reptation is characterized by the reptation time, τ_{rep}, and the reaction of micelle reversible breakage and recombination is scaled with the mean breaking time, τ_{br}, where $\zeta_{br} = \tau_{br}/\tau_{rep}$. For $\zeta_{br} << 1$, the PRM reduces to the classical Maxwell model. The final expression for the dynamic complex modulus, $G^* = G'+iG''$, defined with respect to the dynamic storage, G', and loss, G'', moduli, reads [6]:

$$G^* = G' + iG'' = G_e \frac{i\omega\tau_{br}(1-F)}{i\omega\tau_{br} + F} \qquad (1)$$

where i is the imaginary unit and the universal function F depends on one complex parameter, β, through the following definition:

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

$$F \equiv \frac{2\pi^{1/2}}{\beta^{1/2}} + \sum_{m=0}^{\infty} \frac{b_m}{\beta^{(2+m)/3}}, \beta \equiv \frac{1+i\omega\tau_{br}}{\zeta_{br}} \quad (2)$$

The exact values of the coefficients, b_0, b_1, …, in the infinite series of Eq. (2) are given in Ref. [6,8].

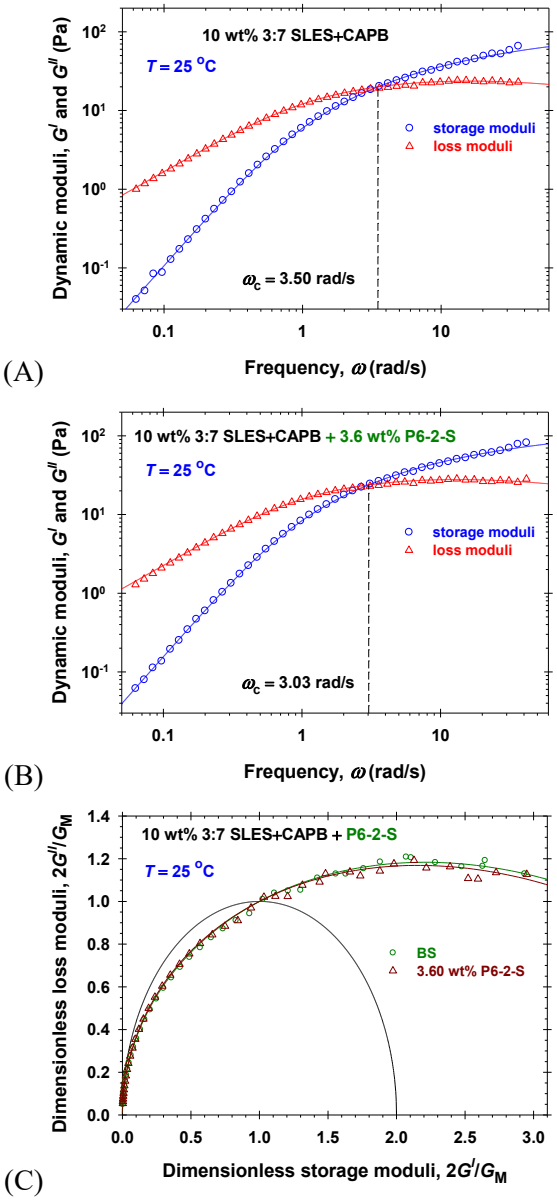


***Fig. 3**. Dependencies of the dynamic moduli on the frequency of oscillations: A) 10 wt% 3:7 SLES+CAPB; B) BS + 3.60 wt% P6-2-S. (C) Cole-Cole plot of the data. Symbols corresponds to experimental data and solid line – to the best theoretical fit using the PRM.*

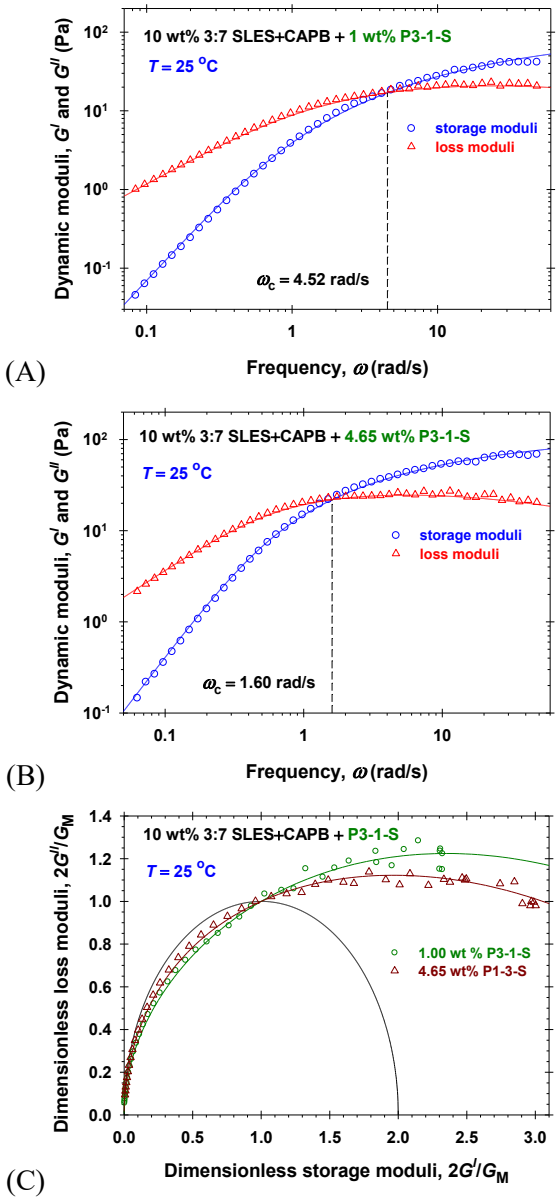


***Fig. 4**. Dependencies of the dynamic moduli on the frequency of oscillations for the basic system in the presence of: A) 1 wt% P3-1-S; B) 4.65 wt% P3-1-S. (C) Cole-Cole plot of the data. Symbols corresponds to experimental data and solid line – to the best theoretical fit using the PRM.*

Figs. 3 and 4 show representative examples from oscillatory experiments. In all studied cases with added different concentrations of P3-1-S and P6-2-S to the basic system, the comparison between the best fits using the PRM (solid lines) and the

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

experimental data (symbols) were excellent. Thus, the PRM is adequate to describe the rheology of the WMS and the obtained physicochemical model parameters are relevant to the rheological properties of the ternary micellar solutions.

If the case of Maxwell model, $G''(\omega)$ plotted against $G'(\omega)$ parametrically eliminating the frequency information is a perfect semicircle (Cole-Cole plot in Figs. 3C and 4C). Even for the basic solution (Figs. 3A and 3C), the deviation from the semicircle is considerable because of the quite large value of $\zeta_{br} = 18.3$. If one assumes that the Maxwell model is approximately valid to the crossover frequency, ω_c, where $G'(\omega_c) = G''(\omega_c) = G_M/2$, then one can formally calculate the value of the zero-shear viscosity from the Cox-Merz rule. These hypothetical values of the Maxwellian viscosity are plotted in Fig. 2. One sees that these values are systematically lower than the experimental data for the zero-shear viscosity. Thus, the deviations from the simplest Maxwell rheological model appear even for low rates of the shear strain. Therefore, to describe the rheological properties of the studied WMS, the more complex PRM must be used.

Fig. 5A summarizes the obtained best fit results for the shear moduli, G_e, vs PGE concentrations added to the basic system. Note that the addition of P6-2-S leads to the lower viscosities (Fig. 2) and higher elasticities (Fig. 5) compared to the addition of the same weight concentration of P3-1-S. For both PGEs, the shear elasticity increases exponentially with the increase of PGE concentration (dashed lines in Fig. 5A). At 10 wt% added PGE, the shear moduli reach values of 197 Pa and 269 Pa for P3-1-S and P6-2-S, respectively. The mesh size of the wormlike micellar solutions, ξ, is related to the shear elasticity, G_e, through the following expression, $\xi = (9.75k_BT/G_e)^{1/3}$, where k_B is the Boltzmann constant, T is the absolute temperature [6]. Therefore, the mesh size of the studied systems decreases from 75 nm without added PGEs to approximately 55 nm in the presence of 10 wt% PGEs.

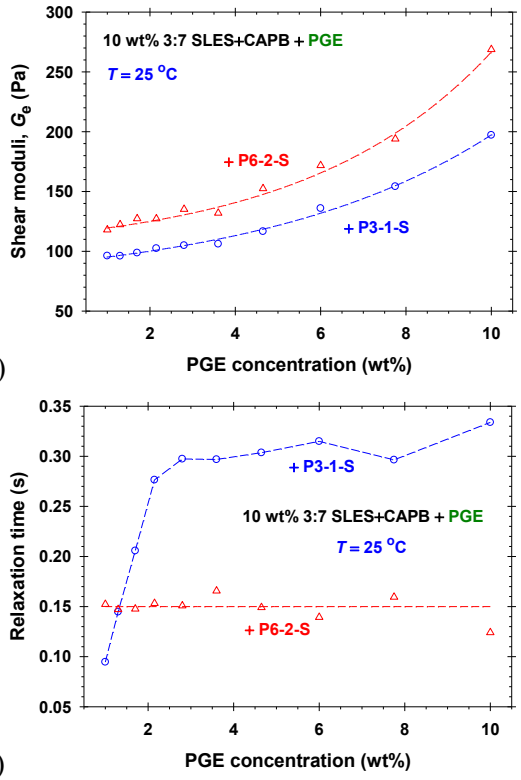


***Fig. 5**. (A) Dependence of the shear moduli on the concentration of added PGE to the basic solution. (B) Dependence of the relaxation time on the concentration of added PGE.*

The appropriate definition of the relaxation time is the ratio between the experimental zero-shear viscosity and the shear modulus of the micellar solutions. The dependence of the relaxation time on the concentration of the added PGE to the basic system is shown in Fig. 5B. Note that in the case of added P6-2-S, the relaxation time is approximately constant of 0.15±0.01 s for all studied concentrations. In contrast, the addition of P3-1-S leads to the sharp increase of the relaxation time with the increase of concentrations up to 3 wt%. For larger concentrations of added P3-1-S, the relaxation time becomes approximately constant of about 0.3 s.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

CONCLUSIONS

Depending on the molecular structure of PGEs (the balance between the number and type of the hydrophobic chains and the number of polyglycerol units), the PGE molecules can efficiently incorporate in the mixed ionic and zwitterionic micelles. The addition of PGEs with stearate chain and smaller number of polyglycerol units (e. g. P3-1-S) to the basic system of 10 wt% 3:7 SLES+CAPB increases the rheological response because of the pronounced growth of the wormlike micelles. With the increase of the size of PGE head (e.g. P6-2-S), the thickening effect of the addition of PGEs becomes lower. In contrast, the addition of more water-soluble PGEs with shorter hydrophobic tail and bulky polyglycerol head (e.g. P10-1-L) decreases the viscosity of the basic system and it has a pronounced shear thinning effect. Generally, the data processing of the experiments with the Poisson renewal model gives adequate information on the characteristic relaxation times, shear elasticity and viscosity of the ternary wormlike micellar solutions. The obtained results could be applied for the fine tuning of the apparent viscosity of salt free products based on the ternary mixtures of ionic and zwitterionic surfactants and PGEs.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research is funded by the European Regional Development Fund under the “Research, Innovation and Digitalization for Smart Transformation” Program 2021–2027, Project No. BG16RFPR002-1.014-0005, Competence Centre “Intelligent Mechatronic, Eco- and Energy-Saving Systems and Technologies”.

REFERENCES

[1] Nicolas-Morgantini L. Giant micelles and shampoos. In: Zana R, Kaler EW (Eds.). Giant micelles. Properties and applications, chap. 17, 2007, pp. 493–514. https://doi.org/10.1201/9781420007121

[2] Ezrahi S, Tuval E, Aserin A, Garti N. Daily applications of systems with wormlike micelles. In: Zana R, Kaler EW (Eds.). Giant micelles. Properties and applications, chap. 18, 2007, pp. 515–544. https://doi.org/10.1201/9781420007121

[3] Sullivan PF, Panda MKR, Laffite V. Applications of wormlike micelles in oilfield industry. In: Dreiss C, Feng Y (Eds.). Wormlike micelles. Advances in systems, characterization and applications, chap. 12, 2017, pp. 330–352. https://doi.org/10.1039/9781782629788-00330

[4] Zakin JL, Maxson AJ, Saeki T, Sullivan PF. Turbulent drag-reduction applications of surfactant solutions. In: Dreiss C, Feng Y (Eds.). Wormlike micelles. Advances in systems, characterization and applications, chap. 13, 2017, 353–378. https://doi.org/10.1039/9781782629788-00353

[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. Adv. Colloid Interface Sci. 2020;275:102062 https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102062

[6] Danov KD, Radulova GM, Petkov JT, Ung YW. On the rheology of linear wormlike micellar solutions. JCIS Open 2025;20:100160. https://doi.org/10.1016/j.jciso.2025.100160

[7] Granek R, Cates ME. Stress relaxation in living polymers: Results from a Poisson renewal model. J. Chem. Phys. 1992;96:4758–4767. https://doi.org/10.1063/1.462787

[8] Chen V, Drucker CT, Love C, Peterson J, Peterson JD. Analytical solution for the linear rheology of living polymers. J. Non-Newtonian Fluid Mech. 2024;334:105343. https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2024.105343

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

СХЕМИ НА УСТАНОВЯВАНЕ И ИЗБОР НА ИНСТРУМЕНТИ ПРИ МЕТАЛОРЕЖЕЩИТЕ МАШИНИ

METHODS FOR CLAMPING UP AND SELECTION OF TOOLS FOR METAL-CUTTING MACHINES

Hristo Yakimov
TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract
In modern mechanical engineering, CNC metal-cutting machines are increasingly used to machine workpieces made of various materials to high standards. This article outlines the main stages and the necessary steps to follow before starting the machining of a given workpiece. Creating a control program, selecting bases, clamping devices, the manufacturability of the workpiece, and other factors are of paramount importance for the cutting process and for producing a high-quality workpiece.

Keywords: Metal-cutting machines, numerical control, material cutting, manufacturing processes

ВЪВЕДЕНИЕ

Качеството на дадено изделие се определя от съвкупността на неговите характеристики и свойства, които му позволяват да отговаря на определени изисквания и потребности. Тези свойства могат да бъдат най-различни, в зависимост от вида, характера, натоварването и много други. За оценка на качеството се извършва чрез система от показатели, които изразяват количествено отделни или няколко взаимосвързани свойства. Когато показателят описва само едно свойство, той се нарича единичен, а когато обхваща няколко свойства едновременно – комплексен. За всеки показател се определят определени стойности и допустими граници на отклонение, чрез които се осигурява правилното, ефективно и икономично функциониране на изделието.

От голямо значение е вида на металорежещата машина, върху която се осъществява процеса рязане.

В процеса на обработка се генерират множество сили на рязане (Fx, Fy, Fz), вибрационни полета, който в комбинация могат да доведат до увеличаване определени отклонение от изискуемите характеристики на изделието.

Също така експлоатационните показатели на машините и съоръженията в голяма степен зависят от качеството на повърхнините на детайлите, който ги изграждат, като се делят на две групи показатели[1]:

- ✓ Геометрични показатели;
- ✓ Физико-механични характеристики.

Според Metev at. Al, геометричната точност се характеризира с точността във

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

взаимното разположение на работните органи на машините, които определят взаимното разположение на инструмента и заготовката, според които металорежещите машини се разделят на пет класа:

- ✓ машини с нормална точност - клас I или Н
- ✓ машини с повишена точност - клас II или П;
- ✓ машини с висока точност - клас III или В;
- ✓ машини с особено висока точност - клас IV или А;
- ✓ прецизни машини, предназначени за обработване - клас V или С.

Кинематичната точност се свежда до кинематични вериги на машините. Основна тяхна функция е съгласуване на определени работни движения за осигуряване зададена траектория на движение на инструмента или стойности на движенията. Основни елементи на кинематичните вериги са двигателни винтове, съчмено винтови двойки, зъбни и червячни колела, червяци и др.

Силовата стабилност се характеризира със способността на възлите и елементите да се съпротивляват на срещу статичните и или динамичните силовите натоварвания.

Топлинната стабилност се отнася до топлинните деформации на елементите на металорежещите машини, които възникват под действието на голям брой топлинни потоци, като те могат да произлизат от процеса на рязане или от обкръжаващата температура на производственото помещение, като съвременните обработващи машини разполагат с темодатчици и отчитат температурата и отклоненията в елементите.

Целта на статията е систематизиране и пояснява на често срещаните етапи (коректен избор на бази, структура на управляваща програма, инструментало държачи) при обработването на изделия върху металорежещите машини с цифрово програмно управление довеждащи до генериране на отклонения.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Получаването на все качествени изделия, надминаващи изискуемите критерии е приоритет и обща цел, за спазването на която е необходимо спазването на редица изисквания, някой от който са:

Проектирането на стругови операции за машини с цифрово програмно управление включва няколко основни етапа. Първи етап се разработва технологична схема, след което се избира подходящ начин и средства за установяване на заготовката. Следва определяне на последователността на обработките, избор на необходимите режещи инструменти и задаване на подходящи режими на рязане. На следващ етап се определят координатните връзки и траекториите на движение на инструментите, след което се създава управляващата програма. Накрая се извършват настройка на инструментите, тестване (прогонване) и прецизиране на програмата.

1. Установяване на заготовките.

Изборът на подходящ начин за установяване на детайла се определя от няколко основни фактора:

- ✓ Габаритни размери;
- ✓ Съотношението между L/D;
- ✓ Базовата повърхнина;
- ✓ Взаимното разположение на отделните повърхнини.

В процеса струговане се реализират различни схеми на установяване:

- ✓ Установяване в патронник (тричелюстен, черичелюстен или шестчелюстен самоцентриращи);
- ✓ Установяване между центри;
- ✓ Установяване в патронник и център;
- ✓ Установяване в патронник и люнет;
- ✓ Установяване чрез профилни челюсти.

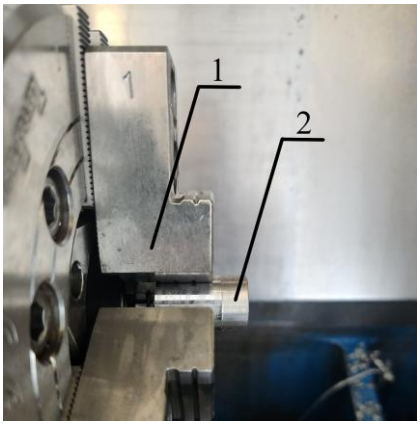
Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Част от схемите, характерни за универсалните стругове, не се прилагат при програмното управление, тъй като не позволяват ефективно механизиране и автоматизиране на производствения процес.

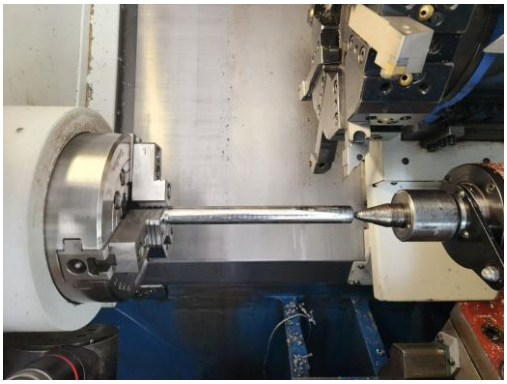
На фиг. 1 е показано установяването в патронник се използва се за обработка на детайли с отношение L/D<3

Установяване на патронник и център е показно на фиг. 2, приложение намира при обработка на част от дължината на заготовката.

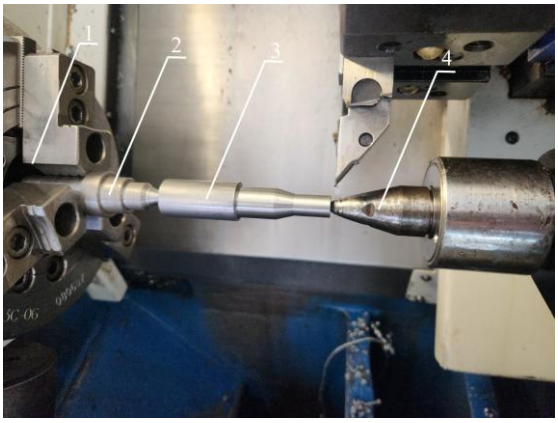
Установяване между центри е показано на фиг. 3, като намира приложение при обработка на различни геометрии със специфични изисквания от гледна точка на базиране



***Фиг. 1**. Установяване в патронник*
1 – патронник, 2 обработван детайл



***Фиг. 2**. Установяване в патронник и център*



***Фиг. 3**. Установяване в патронник*
1 – патронник, 2 – преден център, 3 - обработван детайл, 4 – заден център

Правилността на установяване на заготовката е от изключително значение, поради възникващите сили и явления в процеса рязане. Върху установяването влияние оказват и силите на натяг на челюстите и задния център. При обработка на тънкостенни детайли, големите сили водят до деформации в геометрията на заготовката, при обработка на детайли с големи линейни и малки диаметрални размери прекалено големите сили в задното седло водят до нежелани влияние по дължина на изделието

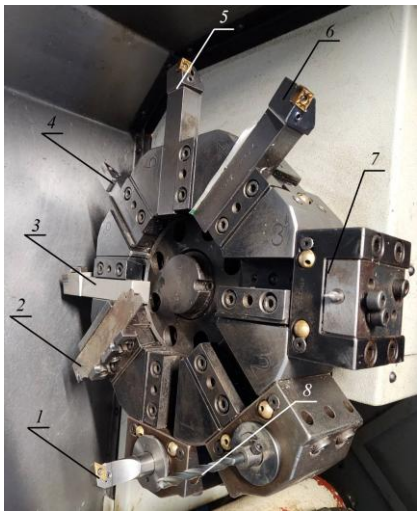
2. Избор на екипировка

Избора на инструмен и инструментало държач е изключително важен за качеството на изделията. За да се дефинира като режещ инструмент, то трябва да са налице режеща и захващаща част. При избора на режещата част се съблюдават определени изисквания към физико-механичните свойства на инструменталния материал и геометричната характеристика:

- ✓ Топлопроводимост;
- ✓ Топлоустойчивост;
- ✓ Износоустойчивост;
- ✓ Твърдост;
- ✓ Якост.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

При струговите машини при условие че главното движение на рязане се извършва от заготовката, а подавателните движения от инструмента, то те са инсталирани върху револверни глави, като изборите на инструменталодържачи се биват с кръгло напречно, квадратно, правоъгълно напречно сечение и модулни инструменти (фиг. 4).



***Фиг. 4**. Револверна глава*
1, 8 – инструменти с кръгло напречно сечение на захващащата част, 2, 7 – модулен инструмент, 3-6 инструменти с квадратно напречно сечение на захващащата част

При избора на инструмент от такъв тип се предвижда вида, големината и посоката на натоварването при обработка и избира инструмента (режеща, захващаща част и схема на установяване на пластината).

Често срещаните инструментите извършващи главно движение на рязане при обработващите центри биват със захващане морзов конус 7/24, наричан още ISO конус (фиг.5) и HSK захващане (фиг. 6)

Различните схеми на захващане към металорежещата машина предвиждат различни големини на натоварванията и най-вече различни скоростни диапазони при обработката.

Според [3] морзов конус 40 е предвиден за натоварване до 12000N сила на затягане и 16000rmp, а HSK-A 63 за натоварване до 18000N сила на затягане и 20500rmp.

Важно е да се отчете, че с нарастване на номера на нарастват силите на затягане за сметка на намаляване на максималната честота на въртене

***Фиг. 5**. Захващане морзов конус [3]*

***Фиг. 6**. HSK закрепване [3]*

HSK закрепването бива 8 вида, като най-често срещан в вариант Т.

3. *Използване на специализиран софтуер.*

При обработка на изделия със сложна геометрична форма и многоосна (5-осна обработка) обработка се налага използването на специализиран софтуер (CAD/CAM системи).

Този подход към програмирането се развива все повече и намира широко приложение с масовото използване на CAD системи за създаване на сложно-профилни модели. Създадения модел на изделието, още на етапа на конструиране, улеснява значително работата на програмиста, тъй като не се налага геометрията на детайла да бъде описвана ръчно чрез ISO кодове и създаване на възможности за технически

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

грешки. Данните за използваното технологично оборудване и неговите възможности се съдържат в специални постпроцесори, които играят ролята на звено между CAD модела и управляващата програма. Те включват цялостна информация за конструкцията, технологичните характеристики и системата за управление на металорежещата машина. CAM модулът допълнително предоставя данни за инструментите, необходимите обработки, оптималните режими на рязане и маршрутите на обработка. По този начин CAD/CAM системите създават възможност за по-ефективна връзка между проектирането и производствената подготовка, като съществено ускоряват изработването на детайли и намаляват вероятността за грешки.

След настройване на металорежещата машина, както по-горе бе споменато управляващата програма коректно е да бъде симулирана и „прогонена“.

Симулацията се извършва със стойност на движенията, при който настройчика може да види и оцени траекторията на движение на детайла и инструменталната екипировка. Да анализира безопасните разстояния и зоните с възможна колизия.

След симулиране на процеса за намаляване на вероятността от допуснати грешки металорежещата машина се пуска без заготовка, с намалени стойности на главните и подавателните числа, след което може да се премине към вече реална обработка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статията са показани част от етапите при реализиране на технологичен процес за изработка на дадено изделие.

Дефинирани и пояснени са ключови етапи при избора на ред на работа, проектиране на процеса, закрепване на заготовки и избори на инструменти от гледна точка на установяване.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] Aleksandrova, I. Cutting the materials. University Publishing House "V. Aprilov", Gabrovo, 2015.
[2] Metev H., Krumov K. Metal-cutting machines. University Publishing House "V. Aprilov", Gabrovo.
[3]https://www.sandvik.coromant.com 29.05.2026.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

ANALYSIS OF WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEM WITH EXTENDED AIR GAP

Desislav Iliev
Technical University of Gabrovo

Nikolay Madzharov
Technical University of Gabrovo

Abstract
This publication presents the development of a laboratory mock-up of an inductive wireless power transfer system in which an additional resonant circuit is introduced. The basic designs of the transmitting and receiving parts of these systems are examined. A series of laboratory studies using the developed mock-up—implemented with both planar and toroidal coils—is also presented."

Keywords: Wireless Power Transfer, degree of freedom, efficiency, mock-up.

ВЪВЕДЕНИЕ

През последните няколко десетилетия индуктивните безконтактните предаватели на електрическа енергия (ИБПЕЕ) намират все по-голямо приложение в промишлеността и в бита [1-4]. Това се дължи на много фактори, като някой от тях са чисто технико-експлоатационни:

- отпада необходимостта от галванична връзка между отделните части на устройството, което улеснява оперирането с него;

- избягва се механичните износвания на свързващите проводници, които неизбежно настъпват в следствие на продължителна експлоатация;

- липсата на галванична връзка намалява риска от поражения от действието на електрически ток върху живи организми;

- липсата на механични контакти намалява риска от искри, което позволява устройствата да работят в зони с повишена пожароопасност и в зони с повишен риск от експлозии.

Развитието на схемотехниката и ключовите прибори, на основата на галий и силиция, позволиха да се увеличи работното напрежение и работната честота на преобразувателните устройства, свързани с безконтактните предаватели на електрическа енергия [6-9]. Това доведе до намаляване на габаритните размери, увеличаване на мощността и намаляване на загубите.

Основно ограничение пред тези системи остава малкото разстояние между предавателния и приемния модул, физически дефинирано до D/4, където D е диаметъра на предавателната част [1,2,4]. По този проблем работят редица фирми и научни колективи, които предлагат конструктивни и схемотехнични мерки чрез които става възможно безконтактното предаване на електрическа енергия на по-големи разстояния, съответстващи на съвременните потребности [9,10].

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

В настоящата статия са обобщени съвременните разработки в това направление и научно-изследователската работа на авторите, чрез която се решават редица от проблемите при създаването на високоефективни безконтактни предаватели с увеличено разстояние между предавателна и приемна част.

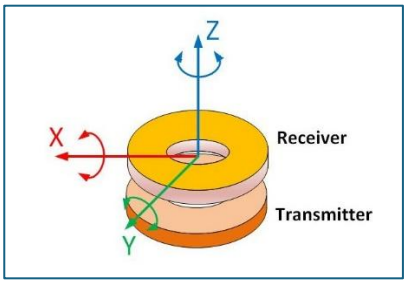
КОНСТРУКЦИИ НА ПРЕДАВАТЕЛНАТА И ПРИЕМНАТА ЧАСТ НА ИБПЕЕ

А. ОСНОВНИ ВАРИАНТИ НА ПРЕДАВАТЕЛНАТА И ПРИЕМНАТА ЧАСТ НА ИБПЕЕ. СТЕПЕНИ НА СВОБОДА.

Основните конструктивни варианти на ИБПЕЕ се определят от степените на свобода, които трябва да има системата, отчитайки взаимното положение на предавателната и приемната част.

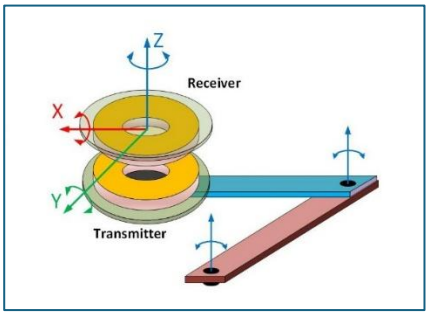
Съществуващите до момента конфигурации на индуктивните БПЕЕ могат да се разделят на четири основни варианта [11,12].

Вариант 1- подвижна приемна (RX) и неподвижна предавателна (TX) част. Най голяма ефективност се постига, когато степените на свобода са сведени до нула- или всички степени са фиксирани и системата е настроена да работи с точно определени параметри и преместването по трите оси и ротацията по тях са предварително известни и са неизменни във времето (Фиг. 1). Този начин на работа на системата изисква много точно позициониране на приемника спрямо предавателя, което в реални условия на експлоатация е практически невъзможно. Най-голямо КПД се постига, когато предавателната и приемната намотка са успоредни една спрямо друга, имат съосност по оста Z и разстоянието между тях е най-малко.



Фиг. 1. *ИБПЕЕ със строго фиксирани степени на свобода.*

Вариант 2- подвижна приемна част и подвижна или частично движеща се предавателна част- това решение позволява да се увеличат в реални условия степените относно преместването по осите X и Y , но не могат да се покрият останалите четири степени на свобода. Практически това е трудно осъществимо, тъй като предавателната намотка трябва да се монтира върху механични рамена или направляващи шини, което усложнява конструктивно индуктивната БПЕЕ (Фиг. 2). Ако се използват допълнителни механизми и последващо усложняване на системата, могат да се покрият всичките 6 степени на свобода.

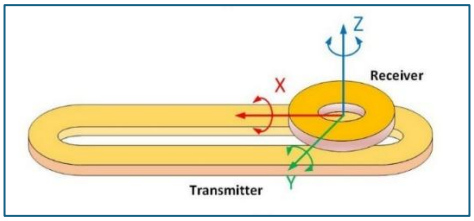


Фиг. 2. *ИБПЕЕ, чиято предавателна намотка е монтирана върху пантограф, който позволява преместване по осите X и Y.*

Вариант 3- подвижна приемна част и неподвижна предавателна част, като предавателната част е значително по-дълга от приемната част. Този вариант дава свобода на системата по оста X. Недостатъците на този вариант са, че в следствие на голямата

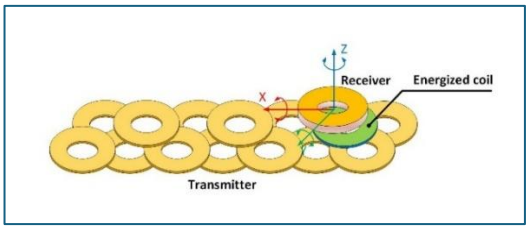
Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

дължина на предавателната намотка се получава голям разсеян магнитен (Фиг. 3).



Фиг. 3. *ИБПЕЕ с една степен на свобода*

Вариант 4- подвижна приемна част и неподвижна предавателна част, която е съставена от отделни предавателни намотки, които са еднакви или подобни по размер с приемната намотка. Чрез превключването на отделните предавателни намотки може да се осъществят две степени на свобода- по осите X и Y. Недостатъка на този вариант е, че положението на предавателната намотка трябва да се следи в реално време и в зависимост от нейното положение да се включва тази предавателна намотка, която е разположена най-оптимално спрямо хоризонталната равнина (X и Y). (Фиг. 4).

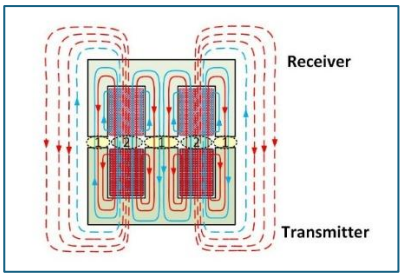


Фиг. 4. *ИБПЕЕ с две степен на свобода и предавателна част, съставена от няколко предавателни бобини.*

Независимо от усложняването на конструкцията (вариант 2), чрез тях не се постига удовлетворително за практическо приложение разстояние между предавателна и приемна части, което налага търсенето на други решения.

В. ВИДОВЕ МАГНИТОПРОВОДИ НА ПРЕДАВАТЕЛЯ И ПРИЕМНИКА

Предавателна и приемна част с Е образен магнитопровод [12]. Тази конструкция е аналогична на традиционния трансформатор с Е- образен магнитопровод, но с междина (Фиг. 5). Предимството на тази конструкция е, че има голям обем, в който могат да се разположат предавателната и приемната намотка. Недостатък на този вид конструкция е, че има значителен разсеян магнитен поток, които експоненциално се увеличава при увеличаване на разстоянието на предаване (зона 1 на фиг. 5). Най-добър коефициент на магнитна връзка се получава, когато разстоянието между предавателя и приемника е най-малко. При увеличаване на разстоянието, коефициента на магнитна връзка много рязко намалява, което се дължи и на факта, че голяма част от магнитният поток, който се затваря директно между предавателната и приемната намотка (зона 2 на Фиг. 5) се превръща в разсеян. В следствие на това и КПД при индуктивния пренос на енергия много рязко намалява. Като предимство може да се посочи, че този вид оформяна на магнитопроводите позволява разместване в много широки граници по осите X и Y.

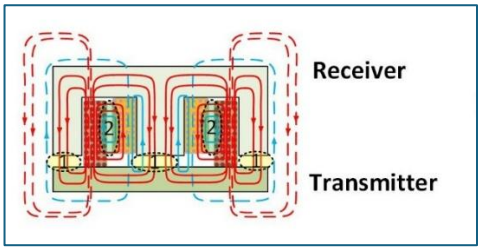


Фиг. 5. *ИБПЕЕ с магнитопровод с Е образна форма.*

Предавателна част с плосък магнитопровод и приемна част с Е образен магнитопровод [12]. Конфигурацията на този тип магнитопроводи е представена на Фиг. 6. Тази конструкция има две предимства спрямо предходната. Едното от тях е, че част от разсеяния магнитен поток на предавателната намотка се затваря през свободната зона от магнитопровода около нея и външния край на Е образния магнитопровод на приемната намотка (зона 1 на Фиг. 6).

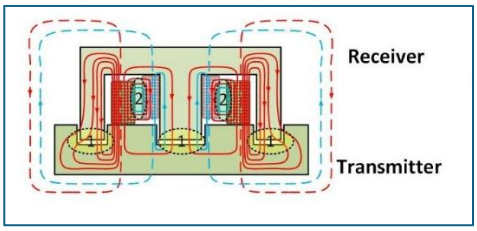
Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Второто е, че тази конфигурация е по-малко чувствителна към изменение на разстоянието между предавателя и приемника. Това се дължи на факта, че магнитният поток, който се затваря директно между предавателната и приемната намотка (зона 2 на Фиг. 6) при увеличаване на разстоянието на предаване компенсира увеличаването на разсеяния магнитен поток в зона 1. Това осигурява запазване на КПД при индуктивния пренос на енергия и при увеличаване на разстоянието на предаване.



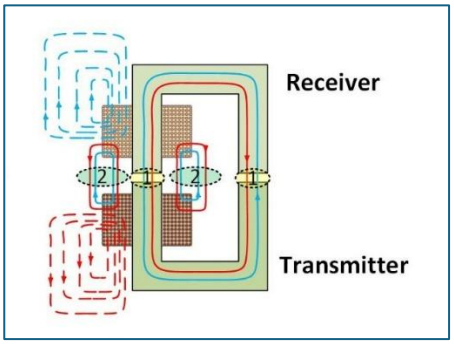
***Фиг. 6**. ИБПЕЕ с предавателна част с плосък магнитопровод и приемна част с Е образен магнитопровод.*

Предавателна част инвертирано Е и приемна част Е [12]. Конфигурацията на този вид магнитопроводи е представена на Фиг. 7. Тя представлява подобрение на предния вариант, тъй като полюсите на приемния магнитопровод се поместват в вдлъбнатините на предавателният магнитопровод (обърнати са на обратно спрямо предходния вариант). Това води до увеличаване на магнитната връзка спрямо предходния вариант, но се изисква много точно позициониране по осите X и Y. За сметка на това пък този вариант позволява увеличаване на разстоянието на предаване, тъй като препокриването на полюсите на предавателя и приемника в (зони 1 на Фиг. 7) намалява разсеяния магнитен поток . Също така общия магнитен поток, който се затваря директно между предавателната и приемната намотка (зони 2 на фиг. 7) компенсира увеличаването на разсеяния магнитен поток при увеличаване на разстоянието на предаване. Като недостатък на този вид конструкция е сравнителни малкия обем, в който могат да се разположат предавателната и приемната намотка.



***Фиг. 7**. ИБПЕЕ с предавателна част инвертирано Е и приемна част Е.*

Предавателна и приемна част, оформени като П образни магнитопроводи [12]. Конфигурацията на този вид магнитопроводи е представена на Фиг.8. В този случай има голям обем, в които могат да се разположат предавателната и приемната намотка. Ако се използва медна шина или лента за изграждане на намотките, електрическата плътност няма да е еднаква, а ще бъде изместена към въздушната междина между предавателя и приемника. При използване на меден проводник, а при увеличаване на честотата и литцентрат токовата плътност ще е равномерна в цялото сечение на намотките. Като недостатък може да се посочи големия разсеян магнитен поток-както в въздушната междина (зони 1 на Фиг. 8), така и около тази част на намотките, които не са обхванати от магнитопровода (зони 2 на фиг. 8).

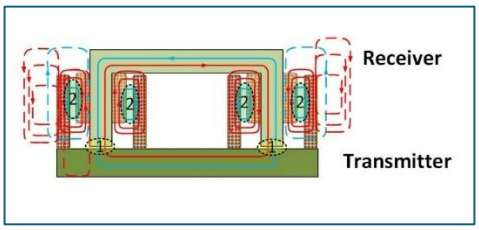


***Фиг. 8**. ИБПЕЕ с предавателна и приемна част, оформени като П образни магнитопроводи*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Този вид магнитопроводи е подходящ за изграждане на системи, чиито разстояние на предаване е строго фиксирано и малко.

Предавателна част с плосък магнитопровод и приемна част П образен магнитопровод [12]. Конфигурацията на този вид магнитопроводи е представена на Фиг. 9. Предимството на този вид конфигурация е, че тя има сравнително малък разсеян магнитен поток и малки активни загуби в проводниците на намотките. Като основно ограничение може да се посочи малкото място за разположение на предавателната и приемната намотка. Тази конфигурация е малко чувствителна при изменение на въздушната междина (преместване по оста Z), но не позволява преместване по осите X и Y.



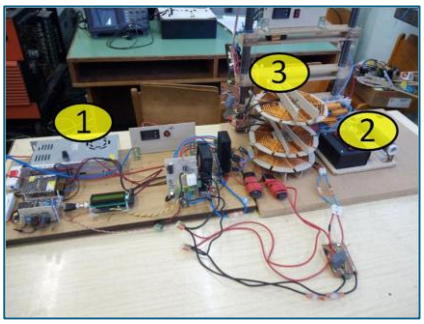
***Фиг. 9**. Разрез на ИБПЕЕ с предавателна част с плосък магнитопровод и приемна част с Е образен магнитопровод*

При увеличаване на разстоянието разсеяният магнитен поток се увеличава, но той до известна степен се компенсира от общия магнитен поток, които се затваря между предавателната и приемната намотка (зона2 на Фиг.9).

ЛАБОРАТОРЕН МАКЕТ НА ИБПЕЕ

Изложените по-горе недостатъци на ИБПЕЕ могат да се избегнат, като в системата се внесе допълнителен резонансен кръг (или кръгове), които да се разположат между предавателя и приемника.

За целта се разработи лабораторен макет на ИБПЕЕ, чрез който могат да се реализират всички възможни положения на предавателната и приемната намотка в пространството, както и да се добавят резонансни кръгове. В зависимост от диаметъра на предавателната и приемната намотка, разстоянието на предаване може да се увеличи до два пъти от диаметъра им (2D) и да се правят изследвания на различни параметри на ИБПЕЕ- ток, напрежение, мощност, КПД и други (Фиг.10).



***Фиг. 10**. Външен вид на лабораторния макет. 1- предавателна част; 2- приемна част и 3- механична система за пространствено ориентиране на намотките*

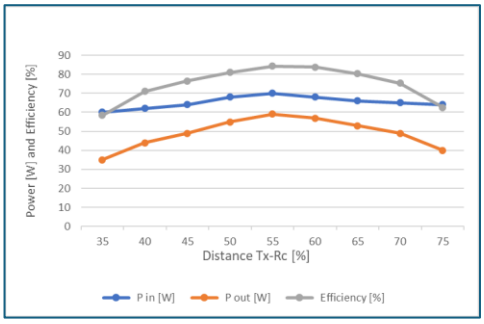
В предавателната част на макета са включени захранване, амперметър и волтметър, генератор на честота, честотомер и усилвателен модул. В приемната част на макета съдържа изправителен блок с бързи диоди, волтметър и амперметър и комбинация от товарни съпротивления. Третата част представлява механична система, на която са монтирани предавателната (TX) и приемната (RX) намотка на системата, както и допълнителния резонансен (RC) кръг. Предавателната, приемната намотка и допълнителния резонансен могат да се сменят, както в единия случай могат да са планарни, а в другия случай да са тороидални. И с двете механични системи могат да се провеждат експерименти при едни и същи разстояния между предавателните и приемните намотки, както и да се извършва ротация по оста X на всяка една от намотките. Това дава възможност на системата да има 4 степени на свобода. Външния диаметъра и на двата вида намотки е 150 мм. Това дава основа да се сравняват резултатите от експе-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

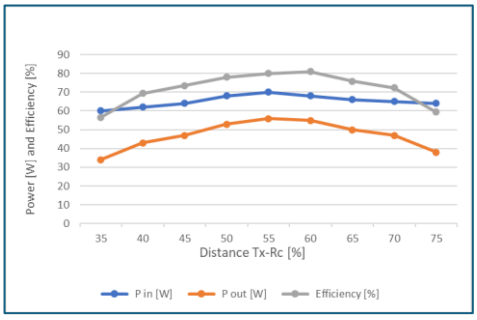
рименитите с двата вида намотки- планарна и тороидална.

ЕКСПЕРИМЕНТИ С МАКЕТА И ОПИТНИ РЕЗУЛТАТА

С лабораторния макет се извършиха две серии от експерименти при дистанция между предавателната и приемната намотка от 100 mm и при различни разстояния на резонансния кръг. В единия случай се използваха планарни намотки, а в другия тороидални намотки. Резултатите от експеримента са представени на Фиг. 11 и фиг. 12.



***Фиг. 11**. Ефективност на системата при разстояние TX- RX от 100 мм и планарни намотки.*



***Фиг. 12**. Ефективност на системата при разстояние TX- RX от 100 мм и тороидални намотки.*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. От анализа на конструктивните варианти на предавателната и приемната част на ИБПЕЕ и видовете използвани магнитопроводи се стигна до заключението, че с тяхна помощ не може да се увеличи разстоянието на предаване и то да надвиши ограничението от D/4.

2. Създаден е лабораторен макет, който позволява лесно да се променят различни работни параметри на ИБПЕЕ, както и вида на намотките, улеснява значително експерименталната работа.

3. Проведените експерименти с макета доказват възможността чрез въвеждането на резонансен кръг в ИБПЕЕ значително да се увеличи разстоянието на предаване на електрическа енергия, като КПД на системата се запазва в добри граници.

4. ИБПЕЕ, използващо планарни намотки има по-добро КПД от ИБПЕЕ, използващо тороидални намотки.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] Kurs A., Moffatt R., Joannopoulos J.D. and Karalis A., “Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances” in Science, Vol. 317, 6 July 2007. DOI:10.1126/science.1143254M.

[2] Budhia M., Covic G and Boys J.,” A New IPT Magnetic Coupler for Electric EV Charging Systems”; IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 7-10 Nov. 2010; DOI:10.1109/IECON.2010.567530.

[3] Mohsan, S.A.H., Qian, H., and Amjad, H., “A comprehensive review of optical wireless power transfer technology”. Front Inform Tech El 24, 767-800, 2023.

[4] Kurs, A., Karalis, A., Moffatt, R., et al,” Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances”, Science 317, 83-86, 2007.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

[5] A. S. Vuchev, T. G. Grigorova and I. P. Maradzhiev, "A Unified Analysis of LLC Resonant DC/DC Converter with Capacitive Output Filter," 2019 X National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 2019, pp. 1-4, doi:10.1109/ELECTRONICA.2019.8825604.

[6] T. G. Grigorova and A. S. Vuchev, "DC Characteristics of a Series Resonant DC/DC Converter at Variable-Frequency Control Methods," 2018 IEEE XXVII International Scientific Conference Electronics - ET, Sozopol, Bulgaria, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ET.2018.8549614.

[7] Arnaudov D, Todorova T. and Dimitrov V., “Study of LLC Resonant Converter with Multi-Transformer Topology”; 2024 23rd International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA); 12-15 June 2024, Bourgas, Bulgaria; DOI:10.1109/SIELA61056.2024.10637888.

[8] Hinov, N., “Solid-State Transformers in the Global Clean Energy Transition: Decarbonization Impact and Lifecycle Performance Energies”, 2026, 19(2), 558.

[9] Dichev, D., I. Zhelezarov, R. Dicheva, D. Diakov, H. Nikolova, G. Cvetanov. “Algorithm for estimation and correction of dynamic errors”. 30th International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance, MMA 2020, September 2020, Sozopol, Bulgaria, pp. 91-95. DOI: 10.1109/MMA49863.2020.9254261.

[10] Dichev, D., Koev, H., Diakov, D., Panchev, N., Miteva, R., Nikolova, H. “Automated System for Calibrating Instruments Measuring Parameters of Moving Objects”. 59th International Symposium ELMAR, September 18-20 th, 2017, Zadar, Croatia, Proceedings Elmar - International Symposium Electronics in Marine, pp. 219-224. DOI: 10.23919/ELMAR.2017.8124472.

[11] Petrov, P. K., G. Ts. Velev, K. M. Ivanov, Ts. K. Varbov, Determination of the Electrical Field Intensity Affecting a Person Situated under the Phase Conductor of a High Voltage Power line, 2020 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering Ruse, Bulgaria, November 12-14, IEEE Xplore: 17 December 2020, DOI:10.1109/EEAE49144.2020.9279061, 2020 (Scopus, Web of Science) Electronic ISBN:978-1-7281-0362-4 (5p.).

[12] Madzharov, N., “Contactless Electrical Energy Transmitters”, Technical University of Gabrovo Publishing House "V. Aprilov", Gabrovo, 2017, ISBN 978-954-683-569-7.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

FLYBACK ПРЕОБРАЗУВАТЕЛЯТ КАТО ЕЛЕМЕНТ ОТ СИЛОВАТА ЕЛЕКТРОНИКА НА ЕЛЕКТРОМОБИЛА

FLYBACK CONVERTER AS A COMPONENT OF ELECTRIC VEHICLE POWER ELECTRONICS

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

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

Abstract
This paper presents the application of the flyback converter as a compact and isolated DC–DC solution for electric-vehicle auxiliary systems. The study outlines key operating principles, control features, and design considerations, with emphasis on the UCC28750 controller and its quasi-resonant, high-efficiency operation. A transformer-design methodology is provided, followed by simulation and experimental validation of the proposed converter. The results confirm the suitability of the flyback topology for auxiliary supplies, battery-management modules, and other low- and medium-power EV subsystems.

Keywords: DC-DC converter, flyback converter, power electronics.

INTRODUCTION

The rapid development of electric vehicles imposes increasingly stringent requirements on the power electronic converters responsible for controlling, converting, and distributing electrical energy within onboard systems. Within EV architectures, DC–DC converters ensure compatibility between the high-voltage battery pack, the low-voltage network, auxiliary loads, charging systems, and battery management units [1–3].

Among isolated DC–DC topologies, the flyback converter remains attractive due to its simple structure, low component count, galvanic isolation capability, and support for multiple outputs via a multiwinding transformer [4, 5]. These features make it suitable for low- and medium-power applications in electric transportation, including auxiliary supplies, onboard chargers, low-voltage interfaces, and active cell-balancing circuits [6–8].

In EV systems, the flyback converter can operate not only as a conventional isolated step-down or step-up stage, but also as part of advanced configurations such as multi-output, bidirectional, multiphase, and active-clamp structures. These implementations aim to improve efficiency, reduce voltage stress, minimize switching losses, and enhance electromagnetic compatibility [9–11]. Active-clamp flyback topologies are particularly promising, as they enable efficient recovery of leakage-inductance energy instead of dissipating it as heat [10, 11].

Active balancing of lithium-ion battery cells is another important application of the flyback topology in electric transportation systems. In such systems, energy is transferred

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

between individual cells or cell groups to reduce pack imbalances and improve usable capacity, safety, and battery lifetime [7, 8]. However, applying flyback converters in higher-power systems remains challenging due to increased peak currents, higher voltage stress on semiconductors, magnetic-design complexity, and the need for precise control strategies [4, 9, 12].

Practical implementation of flyback converters is strongly supported by specialized control ICs that enable high efficiency, stable regulation, and reduced power consumption under varying load conditions. In this study, the UCC28750 controller from Texas Instruments is used to drive the proposed converter. This device is intended for flyback AC/DC and DC/DC converters with primary-side regulation and quasi-resonant operation. Its selection is motivated by reduced switching losses, lower electromagnetic interference, and compact, high-efficiency conversion suitable for electric transportation.

This paper examines the application of the flyback converter in electric-vehicle power electronics, focusing on its operating principles, topological features, advantages and limitations, and its suitability for auxiliary supplies, charging systems, and battery-management modules.

POWER ELECTRONICS IN ELECTRIC VEHICLES

Power electronics is a key technological domain enabling the operation of modern electric vehicles. The growth of electric mobility has increased the need for efficient power-conversion systems that ensure reliable energy transfer among the battery pack, traction system, auxiliary loads, and charging infrastructure. In EVs, power electronic converters handle voltage conversion, energy-flow control, motor drive operation, battery charging, and low-voltage supply functions.

The electrical architecture of an electric vehicle typically includes a high-voltage network and a low-voltage onboard network. The high-voltage subsystem (200–800 V) powers the traction inverter, electric motor, and high-power charging circuits. The low-voltage subsystem (12 V or 48 V) supplies control units, sensors, communication modules, lighting, infotainment, and safety electronics [1, 2].

A key interface between these subsystems is the DC–DC converter, which converts energy from the high-voltage battery into stable low-voltage outputs for auxiliary equipment. Depending on requirements, isolated or non-isolated topologies may be used. Isolated converters are especially important in EVs due to safety needs, electromagnetic compatibility, and protection against fault propagation [3].

Among available topologies, the flyback converter is widely used in low- and medium-power auxiliary systems because of its simple structure, galvanic isolation, and low implementation cost. It is well suited for compact designs with reduced component count and multiple isolated outputs [4]. In EVs, flyback converters are commonly applied in auxiliary power supplies, gate-driver circuits, sensor interfaces, communication modules, and battery-management systems.

The increasing integration density of automotive electronics imposes strict requirements on the performance of power electronic systems. High conversion efficiency, reduced switching losses, compact dimensions, thermal stability, and low electromagnetic interference are among the most important design objectives [5]. In addition, electric vehicle converters must maintain stable operation under varying load conditions, wide input voltage ranges, vibration, and elevated ambient temperatures.

Recent advances in semiconductor technologies, particularly silicon carbide (SiC) and gallium nitride (GaN) devices, have

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

enabled the development of more efficient and compact power converters suitable for automotive applications [6]. Together with advanced digital and quasi-resonant control techniques, these technologies contribute to higher switching frequencies, improved power density, and enhanced overall system efficiency. Due to these characteristics, power electronics has become a critical enabling technology in the transition toward sustainable transportation systems. The selection and optimization of converter topologies directly influence vehicle efficiency, battery lifetime, system reliability, and overall energy consumption. Consequently, the investigation of flyback converter applications within electric vehicle power electronic systems remains a relevant and important research topic.

CONTROL OF A FLYBACK CONVERTER USING THE UCC28750

The operation of the flyback converter strongly depends on the control method employed, as it determines the stability of the output voltage, the current stress on the power components, the overall efficiency, and the protection under fault conditions. A basic circuit diagram of the flyback converter is shown in Fig. 1.

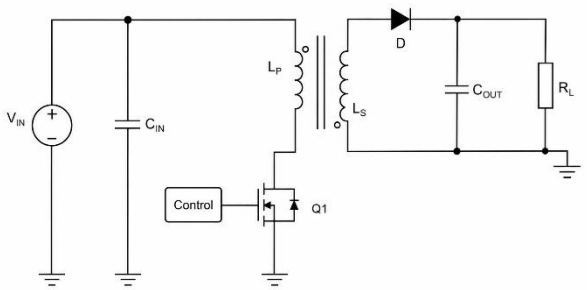


***Fig. 1**. Basic circuit diagram of the flyback converter*

In the present study, the UCC28750 controller from Texas Instruments is employed. This device is a current-mode PWM controller designed for flyback converters with secondary-side regulation.

The UCC28750 is designed for isolated flyback AC/DC converters and is suitable for applications where output-voltage regulation is achieved through secondary-side feedback via an optocoupler. The controller supports continuous-conduction-mode operation and incorporates internal slope compensation to improve stability under current-mode control. Depending on the device variant, the switching frequency is fixed at either 65 kHz or 100 kHz.

Under light-load conditions, the UCC28750 employs frequency foldback and burst-mode operation to reduce switching losses and improve efficiency during no-load or low-load operation. The device also implements frequency dithering to enhance electromagnetic compatibility by spreading the switching-noise spectrum.

The controller integrates several protection mechanisms essential for reliable converter operation, including undervoltage and overvoltage lockout, overpower protection, output short-circuit protection, output overvoltage protection, cycle-by-cycle peak-current limiting, and thermal shutdown. Depending on the specific variant, additional functions such as brownout detection, external temperature protection, or external overvoltage protection can be implemented.

These features make the UCC28750 a suitable choice for studying flyback converter behavior in electric-vehicle power-electronics applications, particularly when a compact, isolated, and well-protected auxiliary power supply with current-mode control and secondary-side regulation is required.

FLYBACK TRANSFORMER DESIGN METHODOLOGY

The transformer-design process begins with selecting the switching frequency and the maximum duty cycle. For the UCC28750, the switching frequency is fixed at 65 kHz under full-load conditions. The maximum duty cycle

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

can be safely chosen above 50%, since the UCC28750 is a flexible controller capable of operating in both discontinuous-conduction mode (DCM) and continuous-conduction mode (CCM). Subharmonic oscillations are mitigated by the device's internal slope-compensation mechanism, which ensures stable current-mode operation [13].

$$D_{max,initial} = 65\% \quad (1)$$

The turns ratio N_S/N_P can be selected using the boundary-condition equations, which simplifies the transformer-design procedure. The maximum drain-to-source voltage V_{DS} of the MOSFET must also be considered during the design process.

The analysis and calculations presented in this study are based on the methodology and data reported in [13].

The initial turns ratio is set using the minimum input voltage and maximum duty cycle, which define the highest average current for the transformer and switch. With N_P=1, the secondary turns are obtained from:

$$N_s = \frac{V_{out}\times(1-D_{max,initial})}{V_{IN,min}\times D_{max,initial}} \quad (2)$$

When selecting the switching MOSFET, the reflected voltage $V_{reflected}$ must be taken into account, as it appears across the transformer during secondary-side conduction.

$$V_{reflected} = V_{IN,max} + \frac{N_p}{N_S}\times V_o \quad (3)$$

It must remain below the MOSFET's rated V_{DS} with additional margin to accommodate the leakage-induced voltage spike V_{margin}.

$$V_{reflected} < V_{margin} \quad (4)$$

The leakage-induced voltage spike consists of additional oscillations that appear across the MOSFET due to the interaction between its output capacitance and the transformer's leakage inductance.

$$V_{margin} = 0{,}8 \times V_{DS} \quad (5)$$

Considering these factors, the turns ratio between the primary and secondary windings can be determined as follows:

$$\frac{N_S}{N_P} < \frac{V_{margin}-V_{IN,max}}{V_o} \quad (6)$$

In this work, a turns ratio of 1:6 is selected. The duty-cycle value may be adjusted by choosing a new maximum duty cycle D_{max}, together with a corresponding turns ratio, in order to achieve the initially targeted D_{max}=65%.

$$D_{max} = \frac{V_{out}+V_{DF}}{\frac{N_S}{N_P}\times V_{IN,min}+(V_{out}+V_{DF})} \quad (7)$$

With the selected turns ratio, maximum duty cycle, input-voltage range, and output-power range, the magnetizing inductance can be calculated using the following expression:

$$L = \frac{V^2_{IN,min}\times D^2_{max}\times T_{sw}\times\eta}{2\times P_{out}\times K_{ccm}}, \quad (8)$$

where: η s the efficiency of the flyback converter; T_{sw} is the nominal switching period; K_{CCM} is a coefficient in the range 0.1–1 that defines the fraction of the maximum output power at which the flyback converter transitions into continuous-conduction mode (CCM).

The inductance expression is obtained by applying the boundary-condition equations and equating the average input power to the average output power, scaled by the converter efficiency.

SIMULATION AND EXPERIMENTAL RESULTS

The designed flyback converter was modeled in the SIMetrix/SIMPLIS environment, and the circuit schematic is shown in Fig. 2 [14]. Based on this model, several simulation studies were performed. The presented results correspond to

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

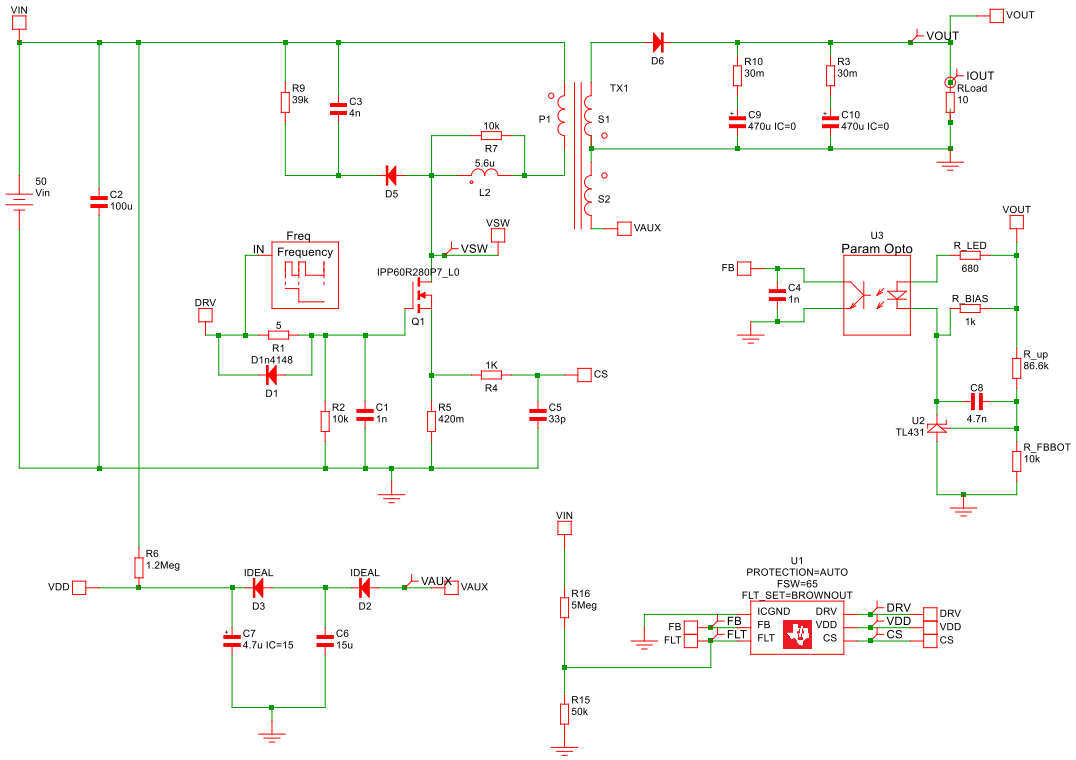


Fig. 2. *Simulation model of the investigated converter.*

steady-state operation for an input voltage of 300–400 V, a switching frequency of 65 kHz, and a load resistance of 10 Ω. Figure 3 shows the waveform of the MOSFET drain-to-source voltage V_{DS} together with the output-voltage waveform at V_{IN}=300V.

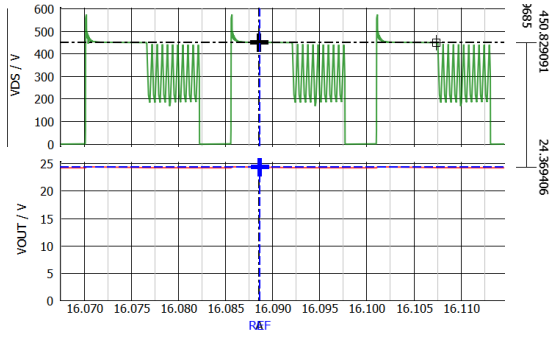


Fig. 3. *Waveforms of V_{DS} and V_{OUT}.*

Simulation results for the MOSFET current I_{FET} and the diode current I_D are also presented in Fig. 4.

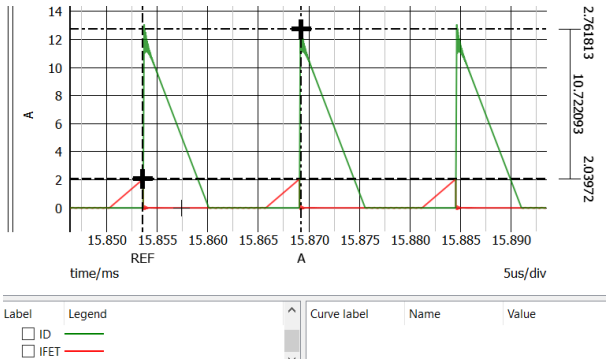


Fig. 4. *Waveforms of I_{FET} and I_D*

Experimental tests of the flyback converter were performed under the same conditions as the simulation. Figure 6 shows the V_{DS} waveform measured with a galvanically isolated probe set to 500 V and an oscilloscope sensitivity of 500 mV/div.

The experimentally measured waveform of the primary-winding current of the transformer is shown in Fig. 7.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

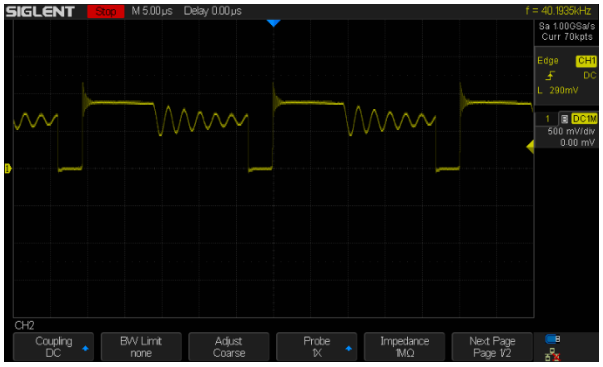


Fig. 6. *Waveform of the drain-to-source voltage V_{DS}.*

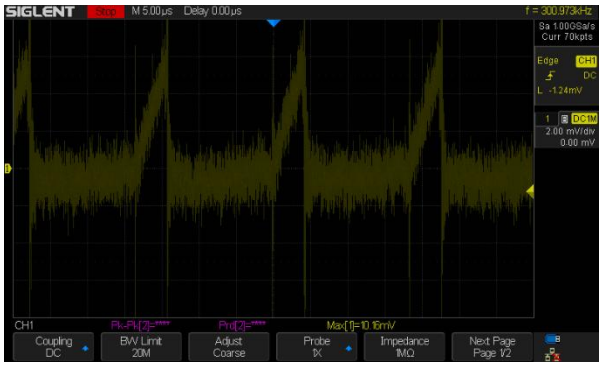


Fig. 7. *Waveform of the primary-winding current of the transformer.*

CONCLUSION

The presented study demonstrated the suitability of the flyback converter for isolated auxiliary power applications in electric vehicles. By combining a straightforward topology with the capabilities of the UCC28750 controller, the converter achieves stable regulation, high efficiency, and reliable protection across a wide operating range. The transformer-design methodology and the obtained simulation and experimental results confirm that the proposed approach meets the functional and safety requirements of modern EV power-electronics systems. These findings highlight the continued relevance of the flyback converter as a compact and effective solution for low- and medium-power automotive subsystems.

ACKNOWLEDGEMENTS

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

REFERENCES

[1] Erickson RW, Maksimović D. Fundamentals of power electronics. 2nd ed. New York: Springer Science+Business Media; 2001.

[2] Mohan N, Undeland TM, Robbins WP. Power electronics: converters, applications, and design. 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons; 2003.

[3] Hosseinzad S, Mirzaei A. A comprehensive review of DC-DC converters for EV applications. Emirates Journal for Engineering Research: Vol. 28, Iss. 2, Article 4, pp.1-18, https://scholarworks.uaeu.ac.ae/ejer/vol28/iss2/4

[4] Sakhare A, Mikkili S, Advanced DC–DC Converter Topologies for Electric Vehicles: Wide Bandgap Technologies, Emerging Trends and Future Challenges," Electrical Materials and Applications, 2025, pp. 1-41, e70023. https://doi.org/10.1049/ema3.70023.

[5] Tahan M, Bamgboje D, T. Hu, Flyback-Based Multiple Output dc-dc Converter with Independent Voltage Regulation," 2018 9th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Charlotte, NC, USA, 2018, pp. 1-8, doi: 10.1109/PEDG.2018.8447884.

[6] Mohamed RK, Chakraborty S, Tran DD, Abramushkina E, El Baghdadi M, Hegazy O. Power electronics converters for electric vehicle auxiliaries: State of the art and future trends. Energies 2023; 16(4):1753.

[7] Selvaraj V, Vairavasundaram I, Flyback converter employed non-dissipative cell equalization in electric vehicle lithium-ion batteries, Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, Volume 5, 2023, 100278, ISSN 2772-6711, https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100278.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

[8] Waghmare T, Chaturvedi P, Sliding mode controller for multiphase bidirectional flyback converter topology in hybrid electric vehicle applications, Energy Reports, Vol. 9, Supplement 10, 2023, pp.40-47, ISSN 2352-4847,https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.05.051

[9] Sangeetha J, Antony A, Ramya D., A Boosting Multi Flyback Converter for Electric Vehicle Application. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2015 10. 1133-1140. 10.19026/rjaset.10.1881.

[10] Kwon HM, Nam SM, Choi JH, Jung CG, Lee JY, Kim YJ, 3.3 kW bidirectional charger design based on active-clamp flyback circuits. Journal of Power Electronics, 2023, 23. 10.1007/s43236-022-00589-6.

[11] Veerendra AS, Suresh K, Rani PS, Rani KR, Varaprasad J, Shah AA. Design and Implementation of Active Clamp Flyback Converter for High-Power Applications. Processes. 2023; 11(10):2980. https://doi.org/10.3390/pr11102980.

[12] Akhtar MF, Raihan SRS, Rahim NA, Akhtar MN, Abu Bakar E. Recent Developments in DC-DC Converter Topologies for Light Electric Vehicle Charging: A Critical Review. *Applied Sciences*. 2023; 13(3):1676. https://doi.org/10.3390/app13031676

[13]https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ucc28750.pdf?ts=1728902760127&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FUCC28750

[14]https://www.ti.com/tool/download/UCC28750-SIMPLIS

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

СРАВНИТЕЛНО ПРОУЧВАНЕ НА КОНТРОЛА НА МОЩНОСТТА НА AL МИШЕНА ПРИ ОТЛАГАНЕ НА CrAlN ТЪНКИ СЛОЕВЕ ЗА ПОВЪРХНОСТНО ИНЖЕНЕРСТВО

COMPARATIVE STUDY OF Al TARGET POWER CONTROL DURING DEPOSITION OF CrAlN THIN FILMS FOR SURFACE ENGINEERING

Vasiliy Chitanov [1,3], Ekaterina Zlatareva[1,3], Stefan Kolchev[1,3], Denis Faik[1], Marin Gioshev[1], Tetiana Cholakova[1], Chavdar Pashinski[1,2,3], Roumen Kakanakov[1], Lilyana Kolaklieva[1]

[1]Central Laboratory of Applied Physics, Bulgarian Academy of Sciences, 61 Sankt Peterburg Blvd., 61, 4000 Plovdiv, Bulgaria
[2]Department of Mechanics, Technical University-Sofia, Bt. Plovdiv, 25 Tsanko Dyustabanov St., 4000 Plovdiv, Bulgaria
[3]Center of Competence “Smart Mechatronic, Eco-and Energy-Saving Systems and Technologies”, Hadji Dimitar str., 5300 Gabrovo, Bulgaria
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract

CrAlN thin layers were deposited using Close-field unbalanced magnetron sputtering. Two power control modes for the magnetrons with Al targets were compared: current mode (Proc I) and voltage mode (Proc U). Proc I showed an unstable transition, while an oscillation in the current trend characterized Proc U. The coatings, obtained with a thickness of 1.73–1.77 μm exhibit a nanohardness of 21–24 GPa and a modulus of elasticity ranging from 340 GPa to 440 GPa. They demonstrate excellent adhesion strength up to a 30 N load and a coefficient of friction against a diamond indenter of 0.091–0.094. The morphology and composition of the coatings were comparable. These power control modes can be used in pulsed DC deposition technology, provided that the differences between the transition periods of the two processes and possible power oscillations are taken into consideration.

Keywords: ключова дума на английски език; ключова дума на английски език.

INTRODUCTION

Closed-field unbalanced magnetron sputtering (CFUBMS) has been developed as a technique for depositing high-quality, well-adhered films for a wide range of industrially important coatings [1]. The sputtering process is based on the ejection of atoms or molecules from the surface of a solid material (the target) due to bombardment by energetic ions of an inert gas (typically argon). During reactive sputtering, reactive gases chemically react with the sputtered target atoms, forming

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

compounds, which are then deposited on the substrate as thin layers. This process may be accompanied by target poisoning due to the formation of a compound layer on the target surface, and thus the sputtering efficiency is reduced [2]. Ternary CrAlN metal nitride layers are gaining increasing attention across various industries. The transition from a binary to a ternary system, achieved by incorporating an additional Al atom into CrN, results in high thermal stability, improved wear resistance, enhanced oxidation resistance, and exceptionally high mechanical properties at elevated temperatures [3]. CrAlN layers exhibit a two-phase structure composed of CrN and AlN. The doping of Al into the CrN matrix strongly promotes the development of a mixed amorphous/ crystalline microstructure [4]. However, the deposition of AlN is associated with several challenges. These include target poisoning, the presence of a metallic phase in the structure of the deposited films, insufficient saturation of aluminum bonds by nitrogen. Furthermore, due to the high reactivity of aluminum, oxygen incorporation often occurs, leading to the formation of columnar, conical, and porous film morphologies [5]. In magnetron sputtering, the voltage is related to the energy of the ions bombarding the target surface, and it has only a minor effect on the sputtering rate. The process current determines the number of ions reaching the target surface and is directly proportional to the sputtering rate. In the reactive sputtering of films with low electrical conductivity, such as AlN, target poisoning directly influences the discharge voltage. Advanced power supplies provide the option to control the power delivered to magnetrons in current, voltage, or power mode under both DC and pulsed regimes. These options allow the comparison of different power modes and the evaluation of their influence on the mechanical and physical properties of the obtained thin layers. The present study aims to deposit Cr/CrN/CrAlN coatings controlling the Al target in pulsed DC mode under identical current and voltage conditions. The technological results will then be compared, followed by an analysis of the mechanical and morphological parameters.

MATERIALS AND METHODS

The thin layers under investigation were deposited on ground cylindrical High Speed Steel substrates with a radius of 13 mm and height of 5 mm.

The deposition equipment is a part of the infrastructure of Central Laboratory of Applied Physics, Bulgarian Academy of Sciences. It was developed by Teer Coatings, England as a Close-Field Unbalanced Magnetron Sputtering System. The vacuum chamber features a height of 1 meter and the diameter is 0.5 meter. Rectangular targets with 99.99 % purity were used: one Cr target and two Al targets. One SI target was operated with low power to prevent significant sputtering onto the substrates. Figure 1 shows the schematic configuration of the vacuum chamber.

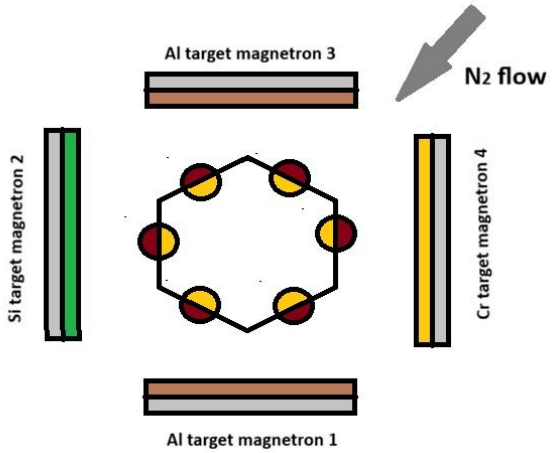


***Fig. 1**. Scheme of the vacuum chamber*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Two deposition processes of Cr/CrN/CrAlN thin layers were done. During the first one the power of the Al targets was controlled with current in Pulse DC mode. In the second batch the power of the Al targets was controlled by voltage analog of the obtained one in the first process. For both batches the base pressure was 3.8×10^{-3} Pa and Argon (Ar) was used as a working inert gas with flow of 25 sccm. Chromium was the leading material for the adhesion and transition layers.

The nitrogen flow was tune with an optical emission monitoring (OEM). The rotation of the sample holder was set at 5 rpm. A bias voltage of 70V in pulse DC voltage mode was applied to the substrate with a pulse frequency (f) of 250 E^3 Hz and a pause 2.5 E^{-6} sec.

Anton Paar equipment (Graz, Austria) was used for characterization of nanohardness, adhesion and thickness of the CrAlN layers. Nanoindentation was used to characterize the nanohardness. Three indentations with normal loads of 20 mN and one with 10 or 15 mN were made. The overage value of the measurements at 20 mN was chosen as representative, excluding the substrate influence. The Poisson's ratio of the coating used for the calculations was 0.25. The scratch tests were performed with a progressive load up to 30N at a speed of 10 N/min. The length of the scratch was 1 mm.

The thickness of the coatings was measured.

Table 1. *Process parameters*

Process control	Layer	I_{cr}	Pulse Regime		I_{Al}	U_{Al}	I_{Al}	U_{Al}	Pulse Regime		OEM	N_2	P	T
			ƒ	Pause					ƒ	Pause				
		[A]	[Hz]	[sec]	[A]	[V]	[A]	[V]	[Hz]	[sec]	[%]	[sccm]	[Pa]	[°C]
I	Cr	4	150 E^{+3}	1.5 E^{-6}	0.5	-	0.5	-	90 E^{+3}	2.22 E^{-6}	-	-	0.199	180-240
U	Cr	4	150 E^{+3}	1.5 E^{-6}	-	200		200	90 E^{+3}	2.22 E^{-6}	-	-	0.213	180-240
I	CrN	4	150 E^{+3}	1.5 E^{-6}	0.5	-	0.5	-	90 E^{+3}	2.22 E^{-6}	80	9.8	0.213	190-250
U	CrN	4	150 E^{+3}	1.5 E^{-6}	-	200	-	200	90 E^{+3}	2.22 E^{-6}	80	9.8	0.227	190-250
I	CrAlN	4	150 E^{+3}	1.5 E^{-6}	10.5	-	11.5	-	90 E^{+3}	2.22 E^{-6}	65	22.4	0.253	210-270
U	CrAlN	4	150 E^{+3}	1.5 E^{-6}	-	210	-	220	90 E^{+3}	2.22 E^{-6}	65	22.5	0.253	210 -270

The temperature was controlled by the plasma and a carbon heater, and preliminary heating was done up to 200 °C. Next, Ar plasma cleaning with a bias voltage of -500 V was applied for 30 minutes. A thin Cr adhesion metal layer was deposited onto the substrates for 10 minutes. Then, a CrN transition layer was deposited with gradually increasing nitrogen flow. Finally, the power of the Al targets (current or voltage) reached the set point value within a fast-growing time of two minutes, followed by a gradually increased nitrogen flow. The main CrAlN layer was deposit with constant parameters for 90 minutes. The deposition process parameters are summarized in Table 1.

by rotating of a steel ball with a diameter of 20 mm using a compact Calotest CAT^2 device. The rotation speed was 1200 rpm The coating thickness was calculated based on the obtained crater geometry. A Hitachi SU5000 scanning electron microscopy equipped with a Thermo Scientific energy-dispersive x-ray spectrometer, was used for observation of the morphology of the sample surface and

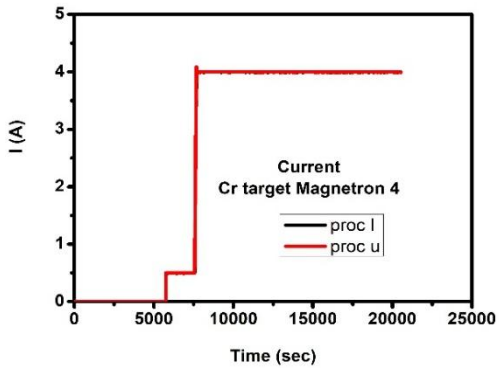
Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

revealing the element composition. The images were obtained using secondary electrons (morphology contrast) and backscattered electrons (density contrast).

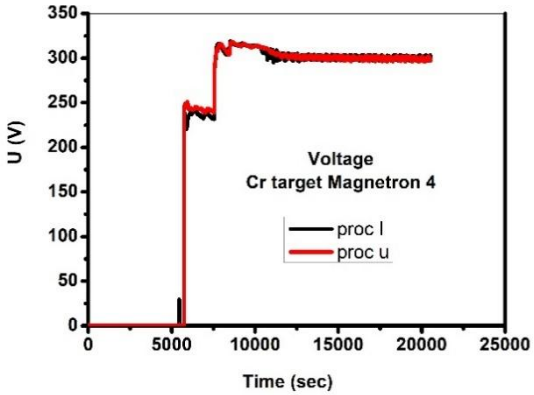
RESULTS AND ANALYSIS

Figure 2 compares the currents and voltages during the two technological processes on the Cr and two Al targets. As it is expected during the both power control regimes of the magnetrons with Al targets, the Cr target is controlled only by the current set point and the trends are identical (Fig. 2a)). The voltage trends of this magnetron are slightly different only in the transition regions of the processes (Fig. 2 b)). The increase of the power of the magnetrons with Al targets also increase the voltage of the magnetron with Cr target, following the increased nitrogen flow and corresponding change from metal to compound surface. The power control of the magnetrons with Al targets showed that when controlled by voltage, the current fluctuated with an amplitude between 2-3 A (Fig. 2c) and e)). The current also increased with a delay. When these magnetrons were controlled in current mode, the voltage was unstable only during the transition periods of power increase, especially when the gradient time step was short (Figure 2 d) and f)).

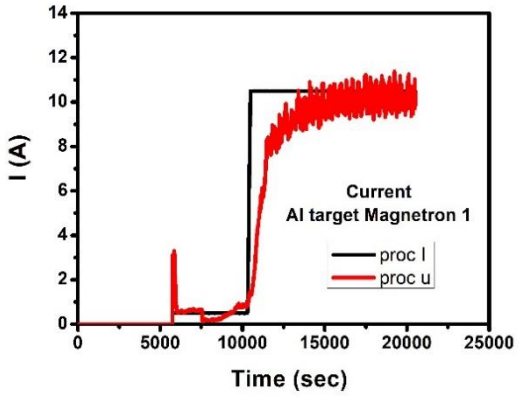
In contradiction to the trend of the current in voltage mode the voltage trend in current mode is directly following the change of set points but during the constant set point it has decreasing trend. The observed trends have to be analyzed taking in mind the different life time of the targets, surface conditions and also pathways to the distribution system of the Ar and N_2 gas mixture that is partly decreased with different power set points to the both Al targets.



a)

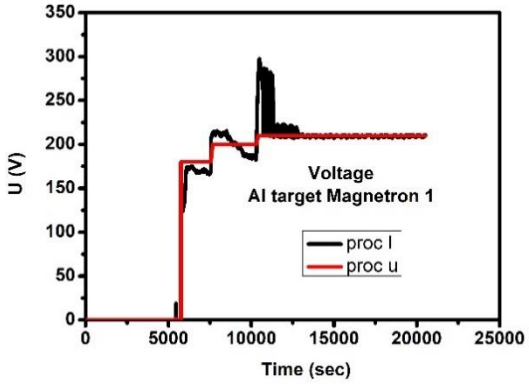


b)

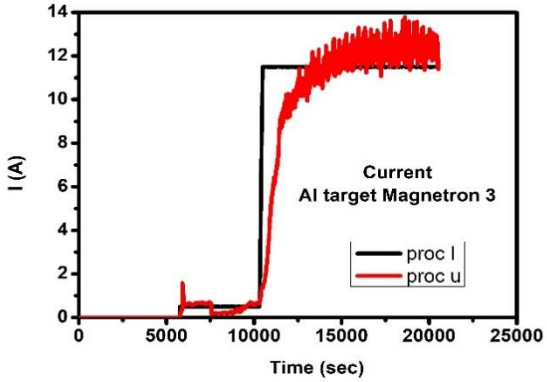


c)

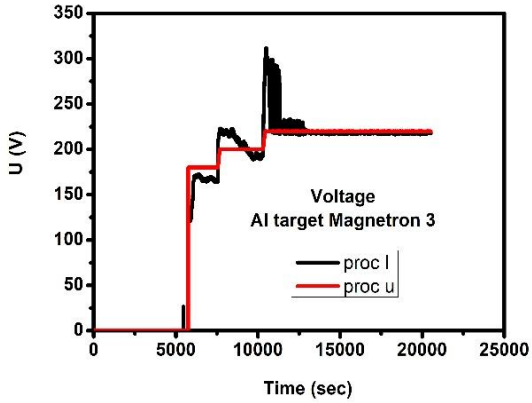
Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие



d)



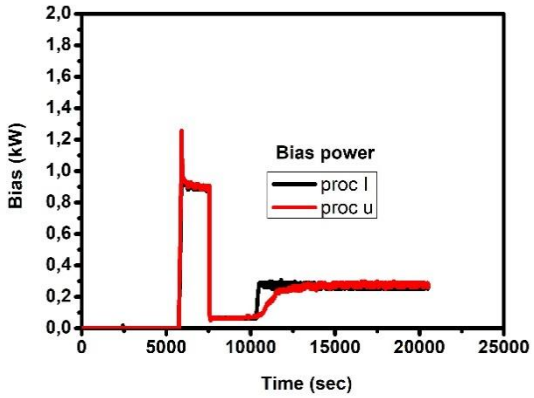
e)



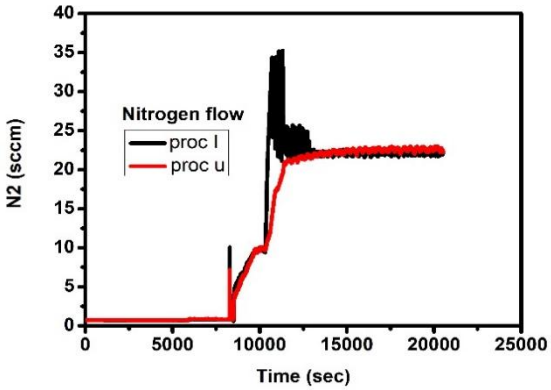
f)

Fig. 2. *Power trends of the magnetrons: a) Current of magnetron 4 target Cr, b) Voltage of magnetron 4 target Cr, c) Current of magnetron 1 target Al, d) Voltage of magnetron 1 target Al, e) Current of magnetron 3 target Al, f) Voltage of magnetron 3 target Al.*

Figure 3 showes the other important technological parameters. The bias power is analogous to the ionization current and the energy of the bombarding ions. As seen in fig. 3 a), the bias trend also has difference in the transition periods. The bias is influenced from the current of the magnetrons with Al targets, whether they are controlled in current or voltage mode. The Nitrogen flow trend (Fig. 3 b)) shows stable OEM control of the working gas during voltage control, and fluctuation in current mode during a fast increase of the current set point.

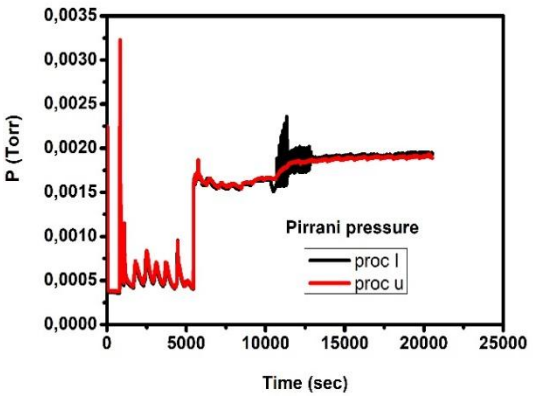


a) Bias power



b) Nitrogen flow

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие



c) Chamber pressure

***Fig. 3**. Other technological parameters: a) Bias power, b) Nitrogen flow, c) Chamber pressure.*

During the deposition of the CrAlN main layer, the OEM controls the nitrogen in current mode with small variation of the gas value (amplitude 0.5 -1 sccm) that is normal operating regime of the MFC and has slightly increasing trend (up to 2 sccm) in voltage mode. A small difference of the gas flow of about one sccm is measured between the both power modes. The chamber pressure is also identical for both processes excluding the period of the working gas fluctuation.
The control of the magnetron power could lead to different resistance in dependence of the target condition. The resistance can increase the temperature of both the target surface and the plasma. These different temperature regimes influence the morphology, composition and resulting mechanical parameters of the thin layers. Figure 4 shows the trends of the substrate temperatures during the both processes and it is seen that they are also identical. Any differences in the target surface and plasma temperatures are negligible for the substrate temperatures.

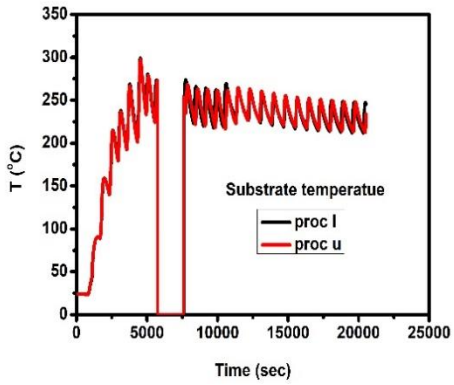


***Fig. 4.** Substrate temperature*

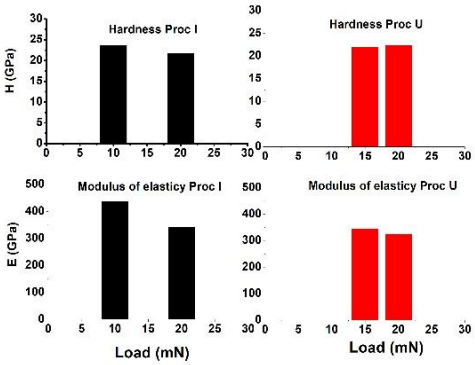


***Fig. 5**. Hardness and modulus of elasticity*

The measured thicknesses of the thin layers 1.73 µm (Proc I) and 1.77 µm (Proc U), are almost equal and there is no difference in the deposition rate of the obtained CrAlN coatings. The hardness of the coatings is between 21 and 24 GPa, and the modulus of elasticity is between 340 and 440 GPa (see Fig. 5). The pictures from the scratch tests are shown in Fig. 6. There are no any adhesive or cohesive failures, delamination and critical failures. The pictures are identical. The measured coefficients of friction against the diamond indenter are 0.091 for Proc I and 0.094 for Proc U, which confirms the similar adhesive properties of the technological regimes.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

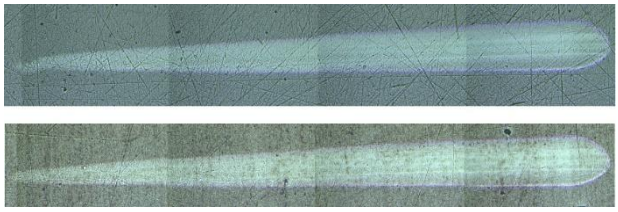


***Fig. 6**. Scratch tracks*

The morphology of both layers is columnar, with equally distributed grains and intercolumnar spaces.

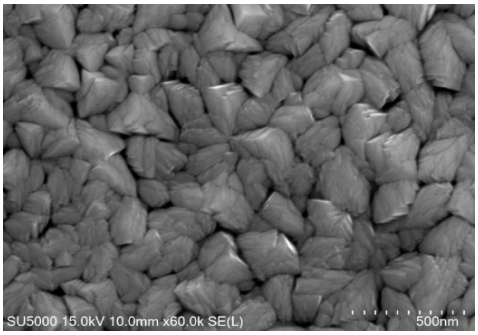


***Fig. 7**. Morphology of CrAlN layers: a) Process I, b) Process U.*

The elemental composition shows a variation of about 1 at.% for the measured Cr, Al and N_2 content (Table 2). These results confirmed the meassured values obtained for hardness, modulus of elasticity coefficient of friction against diamond indenter, thickness and adhesion strength.

***Table 2**. Elemental composition*

Process	Cr [at. %]	Al [at. %]	N [at. %]
Process I	28.3	32.9	38.9
Process U	26.8	33.8	39.4

CONCLUSION

CrAlN thin layers were deposited with CFUBMS under different power control settings of the magnetrons with the Al targets - one controlled with current (Proc I) and one controlled with the voltage output from the first process (Proc U). The observation the technological trends showed an unstable transition during the increase of the current setpoint in Proc I and an oscillation with constant amplitude of the current in Proc U. The nanohardness, modulus of elasticity, thickness, adhesion, morphology and composition are characterized with negligible differences in the compared values. Both power regimes could be used for control of the magnetrons with Al targets whereby in current mode the power of the targets has to be increased slowly, while in voltage mode the oscillation of the current has to be limited to avoid any heating and unexpected changes.

Acknowledgement

This research was funded by the European Regional Development Fund under the Operational Program “Scientific Research, Innovation and Digitization for Smart Transformation 2021-2027”, Project CoC “Smart Mechatronics, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies”, BG16RFPR002-1.014-0005. Research equipment of Distributed Research Infrastructure INFRAMAT, part of Bulgarian National Roadmap for Research Infrastructures, supported by Bulgarian Ministry of Education and Science was used in this investigation.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

REFERENCES

[1] Kelly, P., Arnell, R., Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications, Vacuum, vol. 56, issue 3, 2000, 159-172, https://doi.org/10.1016/S0042-207X(99)00189-X.

[2] Borowski, P., Mysliwiec, Recent advances in magnetron sputtering: from fundamentals to industrial applications, Coatings, vol. 15, issue 8, 2025,922, https://doi.org/10.3390/coatings15080922.

[3] Anwar, S., Anwar, S., Priyadarshini, B., Sankar, R., Evaluation of structural and mechanical properties of CrAlN single layer coating deposited by reactive magnetron sputtering, Materials Chemistry and physics, vol. 29, 2022, p.126873, https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126873.

[4] Tlili, B., Nasser, M., Guizeni, H., Montagne, A., Influence of PVD deposition mode on the quality and integrity of CrAlN thin films: A study of magnetron sputtering processes on stationary and rotating susbstrates, preprint, 2023, https://www.preprints.org/manuscript/202307.0562.

[5] Chodun, R., Nowakowska-Langier, K., Zdunek, K., Methods of optimization of reactive sputtering conditions of Al target during AlN films deposition, Materials Science-Poland, vol. 33, issue 4, 2015, 894-901, http://www.materialsscience.pwr.wroc.pl/

[6] Kakati, H, Borah, S, Study of hysteresis behavior in reactive sputtering of cylindrical magnetron plasma, Chinese Physcis B, vol. 12, issue 12, p. 125201, https://cpb.iphy.ac.cn/article/2015/cpb_24_12_125201.html.

[7] Cherng, J., Chang, D., Effect of pulse parameters on the pulsed-DC reactive sputtering of AlN thin films, Vacuum, vol. 84, issue 5, 2009, p. 653-656, 10.1016/j.vacuum.2009.06.018.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ – ПЛОВДИВ'2026

DED-ARC СИСТЕМА ЗА АДИТИВНО ПРОИЗВОДСТВО В ЛАБОРАТОРЕН КОМПЛЕКС НА ТУ-СОФИЯ, ФИЛИАЛ ПЛОВДИВ

DED-ARC SYSTEM FOR ADDITIVE MANUFACTURING IN THE LABORATORY OF TU-SOFIA, PLOVDIV BRANCH

Svetlana Boshnakova[1,a] **Mehmed Medev[2,b]**

TECHNICAL UNIVERSITY SOFIA, PLOVDIV BRANCH

[1]Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies" (CCSMEESST)
[2]Faculty of Electronics and Automation, Technical University of Sofia, Plovdiv Branch
a) s.boshnakova@tu-plovdiv.bg; b) m.medev@tu-plovdiv.bg

Abstract
In accordance with БДС EN ISO/ASTM 52900:2022, a set up for Directed Energy Deposition acr process (DED-arc) is assembled in Technical University of Sofia, Plovdiv Branch at the Center of Competence „Smart mechatronic, eco- and energy-saving systems and technologies“, revealed within the framework of the implementation of a project under contract BG05M2OP001-1.002-0023-C01. The detailed description of the system is given. It is designed to be used for restoration of pump impellers, nozzles for the chemical/automotive industry, application of wear-resistant coatings and other specific parts manufacturing.

Keywords: Additive Manufacturing, Directed Energy Deposition, Welding, Composites

ВЪВЕДЕНИЕ

В настоящия доклад се представя система за адитивно производство (Additive Manufacturing), изградена за лабораторни и научни цели в лабораторен комплекс към център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии".

Базира се на индустриален робот FANUC ARC Mate 100ID/10L и система за заваряване Fronius TPS 400i, оборудвана с манипулатор.

Адитивното производство (АМ) за автомобилната промишленост става все по-търсено, особено чрез насочено енергийно отлагане с електрическа дъга (DED-arc). То се е утвърдило като процес, който позволява ремонт на високостойностни компоненти, нанасяне на износоустойчиви покрития и изграждане на едрогабаритни структури слой по слой [1-4]. Установката ще се използва за възстановяване на работни колела на помпи, дюзи за химическата/автомобилната промишленост, нанасяне на износоустойчиви покрития и други разнообразни приложения.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

ХАРДУЕРНА КОНФИГУРАЦИЯ

За нуждите на лабораторията е конструирана конфигурацията, показана на фиг. 1.

Фигура 1. *Общ вид на DED-arc системата*

Тя се състои от:
- шест-осен индустриален робот FANUC ARC Mate 100ID/10L;
- заваръчна конфигурация на Fronius TPS 400i с изнесено телоподаване;
- подвижен пулт за управление R-30iB Plus;
- Управление чрез специализиран софтуер.

FANUC ARC Mate 100iD/10L е високопроизводителен робот, оборудван с удължена ръка с обсег от 1636 мм. Той разполага с 6-осна шарнирна конструкция и товароносимост на китката от 10 кг, което го прави подходящ за приложения за АМ.
Роботът осигурява повтаряемост от ± 0,03 мм за постигане на безупречни заваръчни шевове. Системата се управлява от усъвършенстван контролер R-30iB Plus.
Има изградена хардуерна връзка между робота и заваръчното оборудване на Fronius TPS 400i като телоподаването е изнесено. Fronius TPS 400i е интелигентен, изцяло дигитален, микропроцесорно управляван инверторен заваръчен токоизточник от серията TPS/i (Trans Process Solution) на австрийския производител Fronius. Машината е проектирана за високопроизводително и прецизно МИГ/МАГ заваряване, както и за интегриране в автоматизирани системи и роботизирани комплекси за 3D принтиране на метал (DED-Arc). Притежава вграден уеб сървър (SmartManager) и високоскоростни интерфейси (SpeedNet) за бърз трансфер на данни между компонентите и робота.

СОФТУЕРНО ОБЕЗПЕЧЕНИЕ

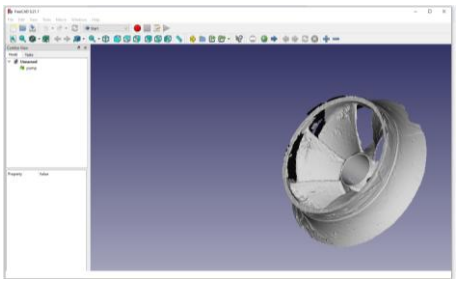
Софтуерът за програмиране на робота FANUC ARC Mate 100ID/10L, заедно с заваръчната установка трябва да отговаря на редица изисквания за да може да извършва прецизно нанасяне на метал съобразно предварително установена траектория. В контекста на DED-Arc адитивното производство, G-кодът (стандартизиран език за програмиране, който управлява движенията и функциите) превежда 3D модела в последователност от траектории, по които заваръчната глава нанася разтопената метална тел слой по слой [5,6].

Изследвани са два варианта за колаборативно управление на робота със заваръчна функция:
1. посредством официалния софтуер за програмиране и симулиране на роботизирани системи на Fanuc – **ROBOGUIDE**;
2. с изнесено управление чрез **RoboDK Robot Development Kit**.

В първия вариант прецизно установяване на режим за 3D принтиране (DED-arc) е възможно едва след генериране и зареждане на готова роботна програма във формат на Fanuc (TP програма), която предварително трябва да бъде създадена или импортирана в ROBOGUIDE. Вторият вариант позволява симулиране и директно генериране на роботна програма, като дава възможност за по-гъвкаво управление и извършване на донастройки в реално време (следене на междуслойна температура, провисване на материала и заваръчни дефекти). За цялостно управление на DED-arc процеса се спряхме на интеграция с **RoboDK Robot**

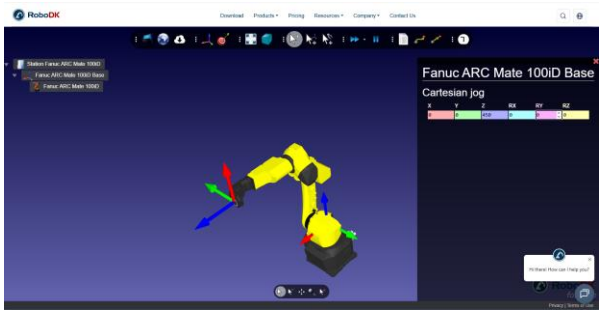
Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Development Kit.
Моделът с желаната геометрия се импортира от CAD/CAM система (в случая FreeCAD), след което се генерира траектория на движение. RoboDK конвертира тази траектория в съвместима роботна програма за Fanuc. Визуализация на CAD/CAM програмата е посочена на фиг. 2.



Фигура 2. *FreeCAD системата*

Софтуерът RoboDK (Robot Development Kit) за управление на робота разполага с модул за роботизирано адитивно производство / WAAM (адитивно производство чрез електродъгово заваряване с тел, което представлява тип DED-arc). Той се използва за извършване на кинематична симулация на заваряването. Общ изглед от софтуера RoboDK (Robot Development Kit) е наличен на фигура 3.

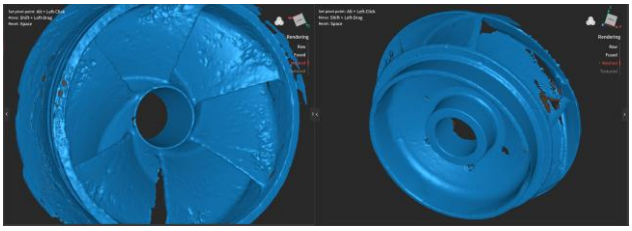


Фигура 3. *RoboDK (Robot Development Kit)*

След като крайната траектория е готова, се провежда симулация с помощта на функцията за добавяне на материал (Material Addition). Заваръчното оборудване Fronius TPS 400i се управлява чрез включване/изключване, а скоростта на подаване на телта се регулира спрямо траекторията. Заваряването се осъществява в режим на роботизирано автоматично взаимодействие с робота, като комуникацията се осъществява чрез връзката с лаптопа посредством RoboDK. Основните променливи параметри на AM процеса са ток, напрежение, скорост на подаване на телта и скорост на придвижване. Режимът на работа е CMT (студен трансфер на метал) с непрекъснати корекции в дължината на дъгата и импулса/динамиката.

ПРИЛОЖЕНИЕ

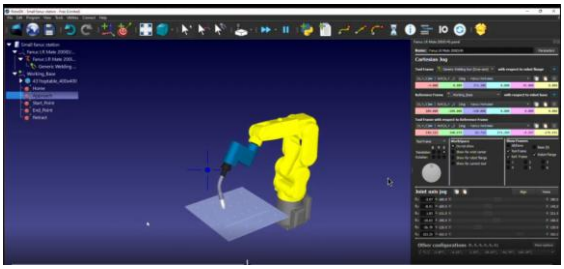
1. Ремонт - възстановяване на работни колела за помпи
След значителен работен пробег на работно колело на помпа, се отчитат повреди, дължащи се на кавитация и ерозия. Работното колело е сканирано чрез скенер на Revopoint, като получената повърхност е показана на фиг. 4.



а) б)

Фигура 4. *Работно колело в изглед а) отгоре и б) отстрани*

След заснемането е направена софтуерна симулация за възстановяване на геометрията. Следват се принципите на послойно нанасяне на метала, като визуализация е направена във фиг. 5.



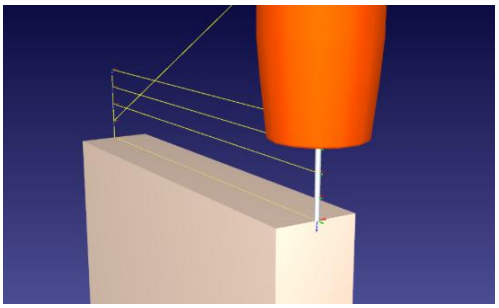
Фигура 5. *Образец за DED-arc*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Наваряване на дефектиралото работно колело ще се извърши след финално оптимизиране на режима за АМ.

2. Оптимизиране - нанасяне на покрития
Покрития от стомани с подобрени характеристики могат да се нанасят върху плоски и ротационни повърхности. На фигура 6 е посочен пример за нанесен слой от Incaloy 625 върху нераждаема стомана EN 10088: X2CrTi12 (1.4512, AISI 409), а симулацията на процеса е посочена на фиг.7.
Полученото чрез DED-arc двуслойно изградено покритие е с дебелина между 2-4 mm.

Фигура 6. *DED-arc износо и корозионно устойчиво покритие*



Фигура 7. *Симулация за нанасяне на DED-arc покритие*

3. Изработка на детайли
Технологията DED-arc се откроява в индустриалния сектор предимно поради изключителната си способност да отлага материал директно върху съществуващи компоненти. Това я прави водещ избор за ремонт и възстановяване на високостойностни детайли, като например индустриални дюзи. За разлика от други адитивни методи, DED-arc предлага по-добра металургична връзка, която гарантира структурна цялост, съпоставима с тази на основния метал, осигурявайки висока устойчивост на термична и механична умора. Тази технология се характеризира с висока производителност на наваряване (високи нива на отлагане), което значително съкращава производствените и ремонтните цикли, особено при едрогабаритни компоненти, чието побиране в стандартна система с прахово легло би било невъзможно. Нейната гъвкавост се допълва и от възможността за интеграция на множество материали, което позволява създаването на функционално градиентни слоеве или нанасянето на специализирани износоустойчиви покрития (твърдосплавно наплastяване) само върху критичните зони. Освен това DED-arc предоставя рентабилно междинно решение, тъй като може да използва сравнително евтини изходни суровини под формата на тел, като същевременно поддържа много по-малка зона на термично влияние в сравнение с традиционното заваряване. Това минимизира деформациите на детайла и запазва свойствата на оригиналния материал. В крайна сметка съвместимостта на технологията с роботизирани ръце и системи с въртящи се маси позволява голям работен обем и производство на компоненти с форма, близка до крайната (near-net-shape), което ефективно намалява отпадъчния материал и необходимостта от последваща мащабна механична обработка.
Предвижда се изработката чрез DED-arc [7] и последваща машинна обработка на образци на дюзи, показани на фиг. 8.

а) б)

Фигура 8. *Общ вид на образци за дюзи в изглед а) отстрани и б) отгоре*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

За да се гарантира, че детайла може да се изработи от метал с DED-arc технология, е направен пробен печат с 3D принтер, но от ABS (Акрилонитрил бутадиен стирен). Визуализация на полученото изделие е показана на фиг. 9.

а) б)

Фигура 9. *3D принтирани дюзи от ABS в изглед а) отстрани и б) отгоре*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разгледана е роботизирана система за DED-arc за изработка на нови детайли за автомобилостроенето, възстановяване на износени такива и нанасяне на покрития. Компонентите на системата и нейната универсалност позволяват използването й както в лабораторни, така и в реални производствени условия за изработка на уникални резервни части и машинни компоненти.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] Bulgarian Institute for Standardization. BDS EN ISO/ASTM 52900:2022 Additive Manufacturing—General Principles—Fundamentals and Vocabulary; BSI: Sofia, Bulgaria, 2022

[2] Kloft, H.; Schmitz, L.P.; Müller, C.; Laghi, V.; Babovic, N.; Baghdadi, A. Experimental Application of Robotic Wire-and-Arc Additive Manufacturing Technique for Strengthening the I-Beam Profiles. Buildings 2023, 13, 366.

[3] Li, Z.; Ruan, H.; Li, M.; Yu, C.; Jia, Q.; Wang, J.; Chen, L. Additive Manufacturing: Prospects and Diverse Applications. Metals 2025, 15, 158.

[4] Lambiase, F., Yanala, P.B., Pace, F. et al. A state of the art review of wire arc additive manufacturing (WAAM) - part2: process improvements and industrial applications. Int J Adv Manuf Technol 2026, 143, 4623–4654

[5] https://www.fanucamerica.com/products/robo t s/roboguide

[6] https://www.fanucamerica.com/products/robots/series/lr-mate/lr-mate-100id

[7] Boshnakova S. Manufacturing Technilogies Comparison for Nozzles. Engineering Proceedings 2026 (submitted)

.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ
„МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

АНАЛИЗ НА РАБОТАТА НА КОНСУМАТОРИ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ ОТ ХРАНИТЕЛНО-ВКУСОВАТА ПРОМИШЛЕНОСТ

ANALYSIS OF THE WORK OF ELECTRICITY CONSUMERS FROM THE FOOD AND FLAVOUR INDUSTRY

Lyubomir Dimitrov
Технически университет- Габрово
DEPARTMENT OF ELECTRIC POWER DISTRIBUTION AND ELECTRICAL EQUIPMENT, CENTER OF COMPETENCE “SMART MECHATRONIC, ECO- AND ENERGY-SAVING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES”, TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO, 5300 GABROVO, BULGARIA

Svilen Rachev
Технически университет- Габрово
DEPARTMENT OF ELECTRIC POWER DISTRIBUTION AND ELECTRICAL EQUIPMENT, CENTER OF COMPETENCE “SMART MECHATRONIC, ECO- AND ENERGY-SAVING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES”, TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO, 5300 GABROVO, BULGARIA

Abstract
Paper deals with the results of research on the quality indicators of electrical energy in the operation of food industry consumers. The products of the graph are compiled and guidelines are given for the need to compensate for reactive loads in the specific facility. To perform the measurements and analyze the operation of electrical energy consumers, a METREL MI 2892 measuring device has been used. The results obtained are presented in tabular and graphical form and conclusions are drawn.

Keywords: power factor; power quality analyzer; power quality.

ВЪВЕДЕНИЕ

Прогресът в областта на съвременните технологии води до завишаване на броя и мощността на електрическите уредби с непрекъснат режим на работа, като една значителна част от тях се явяват нелинейни и несиметрични в електрическо отношение или електрически уредби, характеризиращи се с бързо изменящо се натоварване във времето.

Друг съществен проблем се явява реактивната енергия в електрическите мрежи, която е важен аспект от управлението на електрическата енергия, т.к. оказва влияние върху ефективността и стабилността на електроразпределителната система. Същевременно съгласно Наредба №1/18.03.2013 г. за регулиране на цените на електрическата енергия, за част от върнатата и пренесена през електроразпределителните мрежи реактивна енергия се заплащат санкции [1].

Всичко това предизвиква съществено усложнение в процесите, протичащи в електроснабдителните системи и електрическите потребители. В тези случаи се засилва взаимното влияние, предизвикващо влошаване на показателите за качество на електричес-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

ката енергия, увеличаване на електрическите загуби, намаляване на надеждността на електрическите уредби, снижаване на пропускателната способност по активна мощност на електроснабдителните системи и др. [2]

При проектирането и експлоатацията на електроенергийните системи – ЕЕС се получават три вида електрически товари – активна мощност **P**, реактивна мощност **Q** и пълен ток **I** (съответно пълна мощност S). Кривата на изменение на кой да е от тези товари във времето се нарича товаров график – ТГ [3].

В зависимост от продължителността на обхванатия период – Т, ТГ се подразделят на сменни, денонощни, седмични, месечни и годишни. От тях най-широко приложение намират сменните, денонощните и годишни ТГ. Сменните и денонощните ТГ се използват за оценка на равномерността на електропотреблението и за определяне на максималния и минималния товар. Сменни ТГ за най-натоварената работна смяна на електро-потребителите се използват основно при изследване на максималните товари – активна и реактивна мощност. В производствените предприятия тази смяна по продължителност и време от денонощието съвпада с основната работна смяна на работещите в предприятието и обикновено се приема с продължителност 8 часа. Интервалите на дискретизация Δt обикновено са 5, 10, 15, 30 или 60 минути. В конкретния случай е избран интервал от дискретизация 5 минути, който ще допринесе за сигурно и точно анализиране на консумираната реактивна енергия.

В конкретния случай е третиран групов товаров график на група консуматори (консуматори, присъединени към главното разпределително табло) и се означават с главни букви S = f(t), P = f(t), Q = f(t), I = f(t). Груповите ТГ се използват за определяне на изчислителните електрически товари, за анализ и оптимизиране на режима на електропотребление, за определяне на консумацията на електрическа енергия, за оценка на енергоспестяващи мерки, и др.[4]

В тази връзка са извършени измервания и анализ на работата на консуматори на електрическа енергия в предприятие от хранително-вкусовата промишленост, представляващо млекопреработвателно предприятие.

Консуматорите в разглеждания обект са с различен характер на товара – активен и активно-индуктивен, поради това известна час от тях са консуматори освен на активна енергия и на реактивна енергия.

За намаляване на консумираната електрическа енергия от електроразпределителната мрежа на ”ЕРП Север” е изградена фотоволтаична система, осигуряваща допълнително електрозахранване.

След провеждане на измерванията, извършени във времеви интервал от 8:00 до 20:00 часа е направен анализ на получените резултати за пълната мощност – S, [kVA], активната мощност – P [kW] и реактивната мощност Q [kVAr], както и на коефициента на мощност (PF) cosφ.

Измерванията са проведени с анализатор на качеството на електрическа енергия METREL MI 2892 – фиг. 1, който е част от оборудването на лаборатория С 7.3 „Разработване на съвременни енергийно-ефективни електрокомпоненти и системи с приложение в индустриалния сектор“. Измервателният уред разполага с редица функционални възможности, като измерване на ефективната стойност на електрическите величини (true RMS) и възможност за анализ на качеството на електрическата енергия (измерване по стандарт БДС EN 50160:2006) [5].

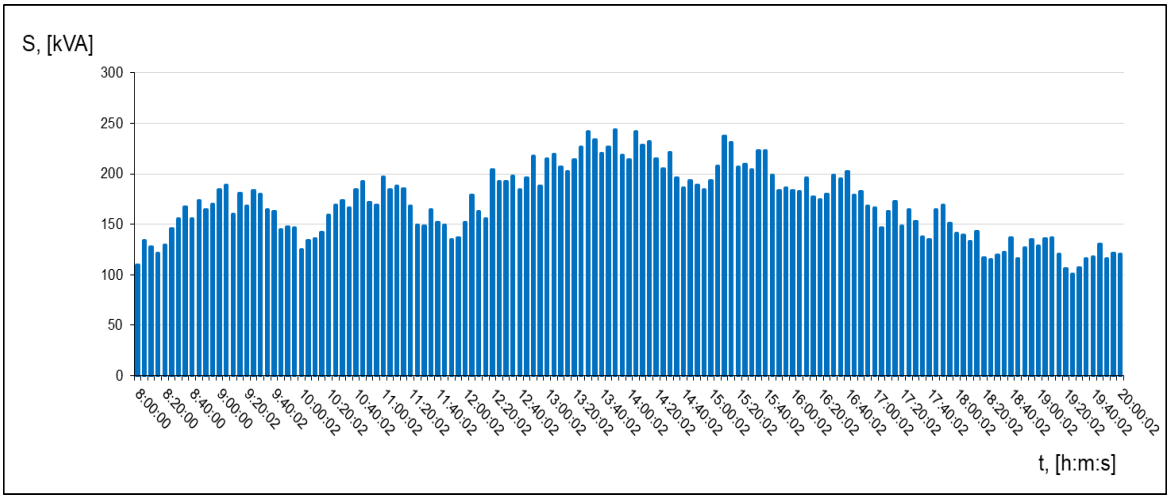
След провеждане на измерванията, извършени във времеви интервал от 8:00 до 20:00 часа е направен анализ на получените резултати за пълната мощност – S, [kVA], активната мощност – P [kW] и реактивната

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

мощност Q [kVAr]. В допълнение са дадени и данни за изменението на тока – I [A] и напрежението U [V].

На фиг. 2 са показани резултати от изменението на консумираната пълна мощност от млекопреработвателното предприятие. Изменението на пълната мощност е в границите от 109.72 kVA до 241.98 kVA, като тези разлики в стойностите зависят от големината на включените товари и тяхната продължителност на работа. Пълната мощност дава една обща картина на работата на всички консуматори, които работят в разглеждания обект. За по-задълбочен анализ е необходимо да се разгледат получените резултати за активната и реактивната мощност.

***Фиг. 1**. Анализатор на качеството на електрическата енергия METREL MI 2892*



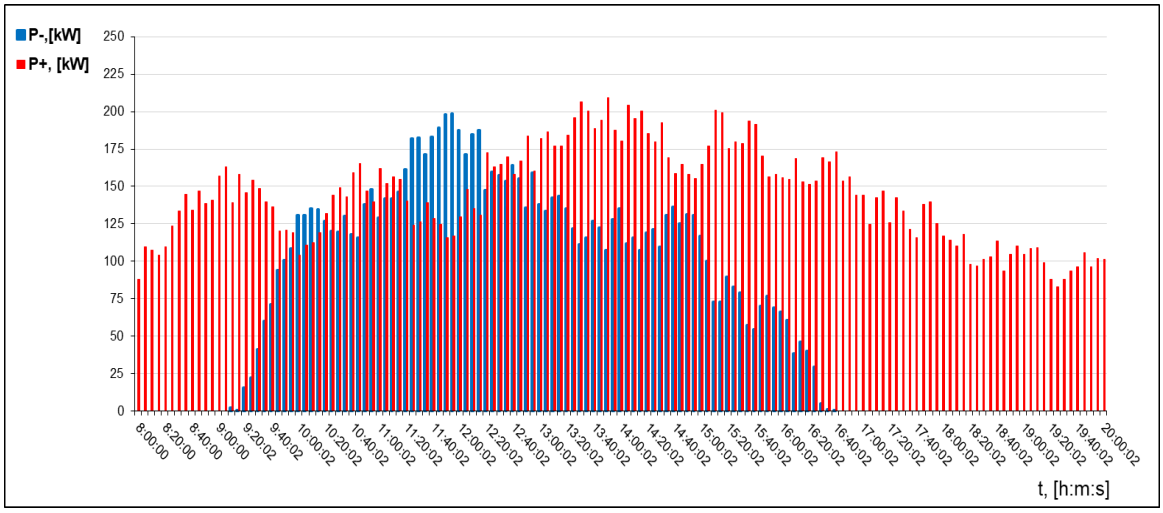
***Фиг. 2**. Сменен товаров график на пълната мощност – S, [kVA]*

На фиг. 3 е даден сменен товаров график на генерираната активната мощност: P- [kW] от фотоволтаичната система и консумираната активна мощност от предприятието: P+ [kW].

От получените резултати се вижда, че инсталираната фотоволтаична система покрива известна част от товара на млекопреработвателното предприятие. Времевият диапазон, в който работи централата, съвпада с част от върховия товар (9:20-16:30 часа) на предприятието и удовлетворява заложените изисквания по отношение на консумирана електрическа енергия от собствен енергоизточник. Максималната моментна генерирана мощност е P = 198.84 kW, докато максималната моментна консумирана мощност е: P = 208.98 kW.

Имайки предвид сезона, в който са извършени измерванията, може да се каже, че инсталираните генериращи мощности оправдават очакванията по отношение на произведената електроенергия.

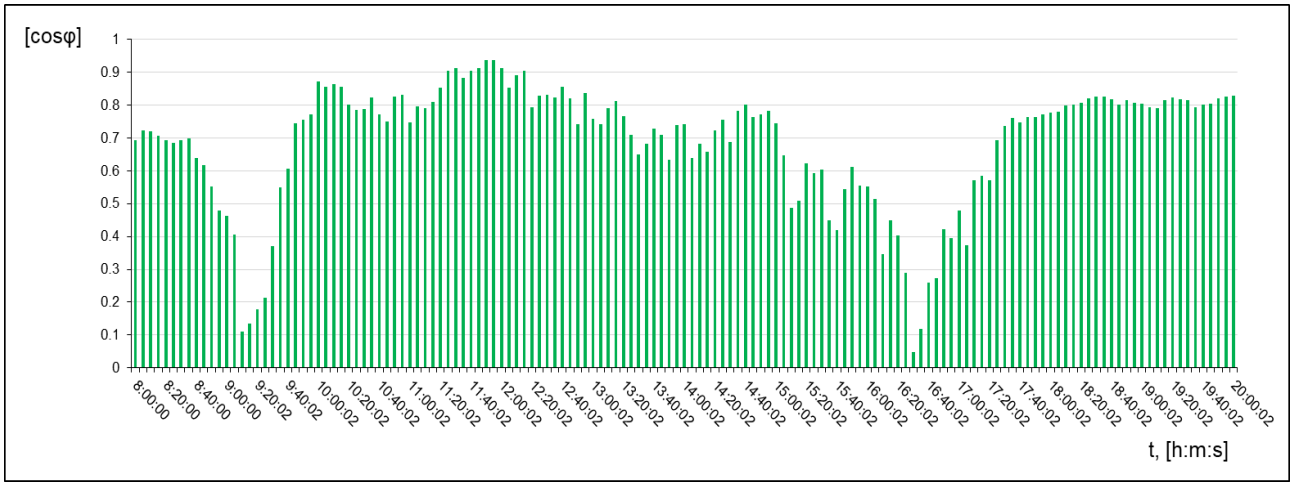
Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие



***Фиг. 3**. Сменен товаров график на произведената и консумирана активна мощност*

На фиг. 4 е дадена графична зависимост на cosφ = f(t). Изменението на коефициента на мощност cosφ показва каква част от консумираната пълна мощност – S е активната мощност – P. Този коефициент дава информация за видовете електрически товари и тяхната работа.

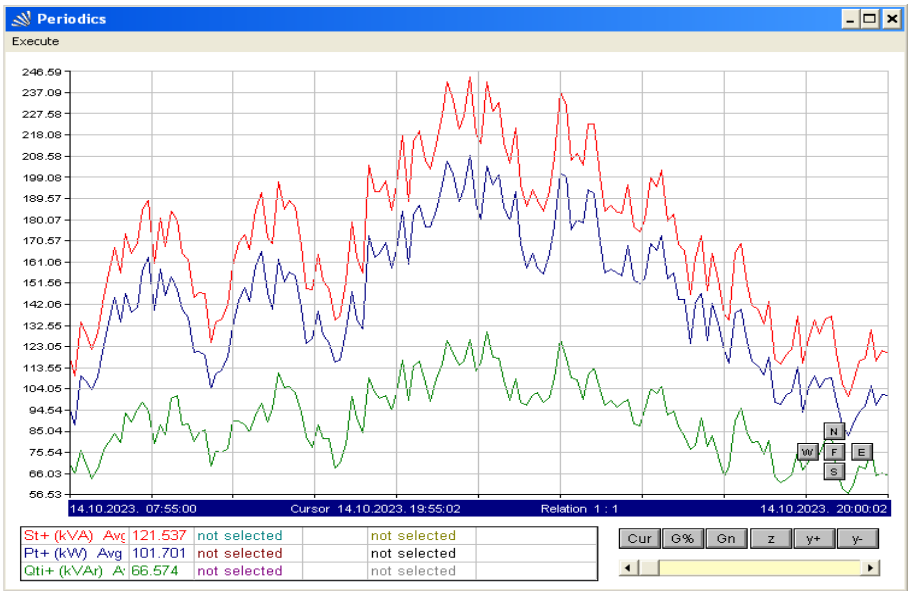
При тези резултати се вижда, че стойностите на коефициента на мощност се колебаят в границите: $\cos\varphi = 0.72_i \div 0.95_c$. Това показва, че е налице прекомпенсиране на реактивните товари. Забелязват се моменти, в които cosφ приема твърде малки стойности, дължащи се работния режим на фотоволтаичната централа. Коефициентът на мощност (cosφ) променя своя знак – от индуктивен (8:00-9:15 часа) преминава в капацитивен (9:15-16:25 часа) и обратно (16:25-20:00 часа).



***Фиг. 4**. Изменение на коефициента на мощност cosφ*

В допълнение са представени резултати относно изменението на средни стойности на пълната – S [kVA], активната – P[kW] и реактивната – Q [kVAr] мощност.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие



***Фиг. 5**. Средни стойности на пълната, активната и реактивната мощност*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Инсталираните консуматори в предприятието са с преобладаващ активно-индуктивен характер. Този тип товари, при тяхната работа консумират значителни количества реактивна мощност, която не извършва полезна работа, а се заплаща на по-висока цена от активната енергия. Води до загряване на тоководещи части и необходимостта от тяхното преоразмеряване – увеличаване на сечението на захранващи кабели, шини и инсталиране на по-големи по ток защитни и комутационни апарати.

Както се вижда от така получените резултати, почти цялата консумирана индуктивна реактивна мощност – Q_i се компенсира от генерираната капацитивна мощност – Q_c от фотоволтаичната централа през периода, в който работи централата. В определен период от времето, когато работят помалко консуматори се наблюдава и прекомпенсиране на реактивния товар, който е в диапазон: Q_c = 5-15 kVAr.

Наличието на повече генерирана капацитивна реактивна мощност Q_c, е неблагоприятен режим, т.к. тази капацитивна мощност се заплаща на висока цена, която се определя от *Наредба №1/14 март 2017 г. за регулиране на цените на електрическата енергия*. Тези стойности на капацитивната реактивна мощност се дължат най-вероятно на режима на работа на инверторите на фотоволтаичната система. Неблагоприятен момент ще бъде тогава, когато работят малък брой консуматори в предприятието. Това ще доведе до генериране на прекомерно количество реактивна енергия с капацитивен характер.

Като обобщение на резултатите от проведените измервания може да се каже, че се наблюдава прекомпенсиране в обедните часове, когато е и върховото производство на фотоволтаичната система. Това прекомпенсиране на реактивната енергия може да бъде ограничено след пренастройване на фотоволтаичните инвертори, т.к. тя ще окаже съществено влияние, когато товарът е малък.

В периодите, когато не работи фотоволтаичната система млеко-преработвателното предприятие консумира реактивна мощност, която би било добре да бъде ограничена с комплектна кондензаторна уредба – ККУ.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ЛИТЕРАТУРА

[1]. Dimitrov L., M. Racheva. OPTIMIZATION OF REACTIVE ENERGY IN A ELECTRICITY DISTRIBUTION GRID, Proc. Of UNITECH 2025, Gabrovo. VOLUME I, pp. I-236 I-240. Print ISSN: 1313-230X. Online ISSN: 3033-1404.

[2]. Dimitrov L., ANALYSIS OF ELECTRICAL QUANTITIES DURING OPERATION OF INDUCTION MOTORS WITH FREQUENCY CONTROL, Proc. Of UNITECH 2024, Gabrovo. VOLUME I, pp. I-36 I-40. Print ISSN: 1313-230X. Online ISSN: 3033-1404.

[3]. Стефнов С., В. Русева. Електроснабдяване. РУ ”Ангел Кънчев”, Русе, 2010 // Stefanov S., V. Ruseva. Elektrosnabdyavane, RU ”Angel Kanchev”, Ruse, 2010. ISBN 978-954-712

[4]. Dimitrov L., D. Koeva. IMPACT OF HOUSEHOLD ELECTRICITY CONSUMERS ON THE POWER FACTOR IN LOW-VOLTAGE GRIDS. INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE „MECHATRONIC, ECO- AND ENERGY SAVING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES“, 26 September 2025, Gabrovo. ISSN: 2815-4924

[5]. Dimitrov L., S. Rachev. ELECTRICAL MEASUREMENTS FOR EVALUATION OF THE OPERATION OF AN INDUSTRIAL COMPRESSOR SYSTEM. ”ENERGY FORUM”, 24-27 June 2025, Varna, Bulgaria. ISSN: 2367-6728.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

СТЕНД ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА РАБОТАТА НА АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ ЧРЕЗ РАЗЛИЧНИ МЕТОДИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ

STAND FOR RESEARCHING THE OPERATION OF AN INDUCTION MOTOR THROUGH DIFFERENT CONTROL METHODS

Lyubomir Dimitrov
Технически университет- Габрово
DEPARTMENT OF ELECTRIC POWER DISTRIBUTION AND ELECTRICAL EQUIPMENT, CENTER OF COMPETENCE “SMART MECHATRONIC, ECO- AND ENERGY-SAVING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES”, TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO, 5300 GABROVO, BULGARIA

Svilen Rachev
Технически университет- Габрово
DEPARTMENT OF ELECTRIC POWER DISTRIBUTION AND ELECTRICAL EQUIPMENT, CENTER OF COMPETENCE “SMART MECHATRONIC, ECO- AND ENERGY-SAVING SYSTEMS AND TECHNOLOGIES”, TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO, 5300 GABROVO, BULGARIA

Abstract
Paper deals with stand implemented for studying the operation of an induction motor with a squirrel-cage rotor using various control methods. An analysis of the possibilities offered by modern devices for starting, stopping and regulating the rotational frequency of three-phase induction motors with a squirrel-cage rotor has been carried out.

Keywords: induction motors; frequency inverter; programmable logic controller, motor soft starter.

ВЪВЕДЕНИЕ

В Европейския съюз – ЕС се използват около 8 милиарда електродвигатели, които консумират близо 50% от електроенергията, която се произвежда там. В индустриалния сектор има значително разнообразие от технологии, приложения и размери, вариращи от малки двигатели, като тези, задвижващи вентилаторите за охлаждане в компютрите, до огромни двигатели в тежката индустрия.

Регламентът за екодизайна на Европейския съюз (ЕС) 2019/1781 определя нови изисквания за енергийните характеристики на разширяващата се гама от двигатели за ниско напрежение от 2021 г. За първи път са включени и регулатори на честотата на въртене за двигателите. Той въвежда задължителни изисквания за екопроектиране на електрическите двигатели и регулатори на честотата на въртене за всички производители и доставчици, които желаят да продават своите продукти в ЕС. През 2021 г. Регламент (ЕС) 2019/1781 е изменен с Регламент (ЕС) 2021/341 на Европейската комисия, който има за цел да изясни и подобри някои аспекти на изискванията за екодизайн, приети през 2019 г.

Регламентът за екопроектиране се прилага за асинхронни електродвигатели с ниско напрежение – номинално напрежение под 1000 V променлив ток (AC) – и регула-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

тори на честотата на въртене (VSD).

Освен че дефинира по-строги минимални нива на ефективност, регламентът също така разширява обхвата на трифазни едностъпкови двигатели от 0,12 до 1000 kW. Същият обхват на мощност важи и за регулаторите.

Регламентът засяга само ефективността на стандартните регулатори за променлив ток. За да се позволи максимално увеличаване на спестяванията на системно ниво, са изключени регенеративни задвижвания и задвижвания с ниски хармоници. Регламентът ще се прилага на две стъпки, като първата влезе в сила на 1 юли 2021 г. Клас на ефективност IE2 става задължителен за честотни регулатори за променлив ток. Регламентът ще обхване трифазни стандартни регулатори от 0,12 kW J Pn J 1000 kW. Вторият етап, който допълнително разширява обхвата и повишава изискванията за двигатели, стартира от 1 юли 2023 г. Степента на ефективност IE4 за двигатели ще стане задължителна за трифазни електродвигатели с 2, 4 или 6 полюса между 75 и 200 kW.

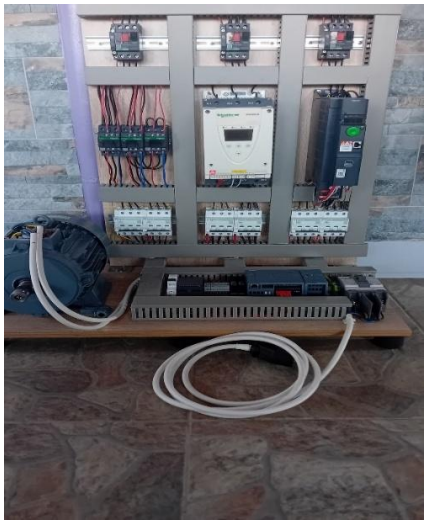
Прегледът, който провежда Европейската комисия, преди да определи новите изисквания за екопроектиране, показва, че системите, задвижвани от електродвигатели, използват около половината от електроенергията, произвеждана в ЕС. През 2015 г. електродвигателите са преобразували 1425 TWh електроенергия в механична и в топлинна енергия, което съответства на емисии в размер на 560 млн. тона CO_2 еквивалент. До 2020 г. се очаква тази стойност да нарасне до около 1470 TWh, а до 2030 г. до 1500 TWh.

Регулаторите на честотата на въртене спомагат за управлението на електродвигателите и увеличават к.п.д. на системите с електродвигатели, като енергопотреблението им е най-важният им екологичен аспект през всички етапи на жизнения цикъл. Прегледът на Европейската комисия още сочи, че през 2015 г. регулаторите на честотата на въртене са преобразували около 265 TWh електроенергия в ток с честота, подходяща за задвижваното приложение. Тази енергия съответства на 105 млн. тона емисии на CO_2. До 2020 г. се очаква преобразуваната енергия да нарасне до около 380 TWh, а до 2030 г. до 570 TWh. Прогнозира се при спазване на приетите Регламенти до 2020 г. да се реализират спестявания от по 57 TWh годишно, а до 2030 г. по 102 TWh годишно [1].

В настоящия доклад е представен стенд за изследване на работата на асинхронен двигател с накъсо съединен ротор – АДНСР.

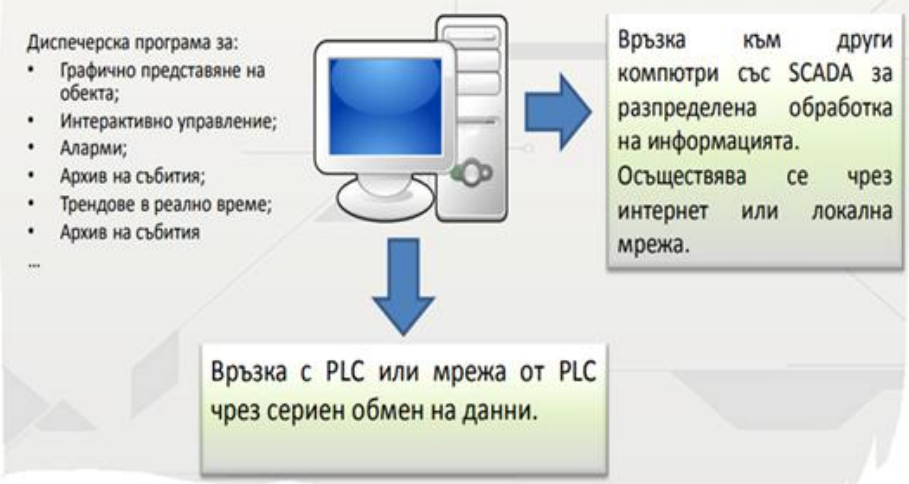
Стендът предлага възможности, свързани с изследвания при работа на АДНСР чрез честотно управление, софтстартер и схема звезда-триъгълник. Процесът на управление е напълно автоматизиран, посредством програмируем логически контролер и приложение на SCADA система.

За защита на изследвания АДНСР са инсталирани автоматични прекъсвачи и моторни защити. За защита на програмируемия контролер в оперативната верига е инсталиран бързодействащ автоматичен прекъсвач.



***Фиг. 1**. Стенд за управление на асинхронен двигател с накъсо съединен ротор*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие



***Фиг. 2**. Блокова схема на системата за управление*

На фиг. 3 е дадена блокова схема на изградената SCADA система за мониторинг и управление на стенда.

Автоматизирана разработка и програмно обезпечаване на реализираната система позволява:

• събиране на първична информация от устройствата на по-ниско ниво;

• регистрация на сигнали за аварийни ситуации;

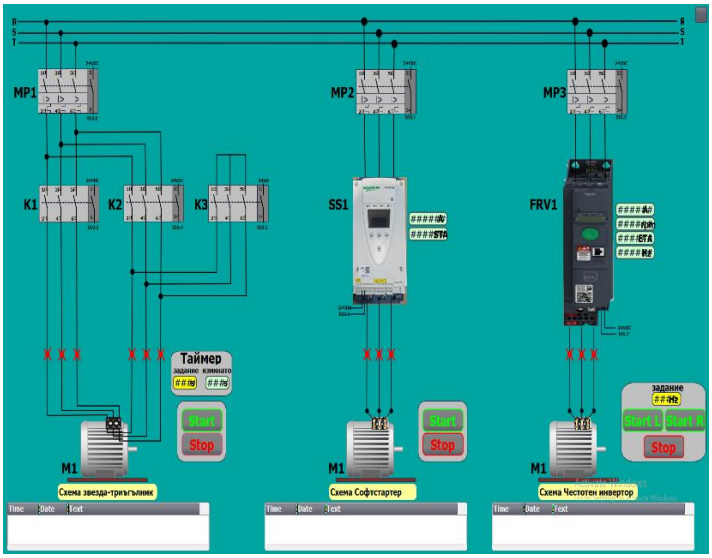
• съхраняване на информация с възможност за нейната последваща обработка (чрез интерфейси и база данни);

• средства за обработка на първичната информация;

• средства за визуално представяне на информацията във вид на графики и хистограми;

• възможност за промяна и наблюдение на всички величини и параметри;

• SCADA системата е проектирани така, че съществува строго разпределена архитектура на функциите [2].



***Фиг. 3**. Визуализация на реализираната SCADA система*

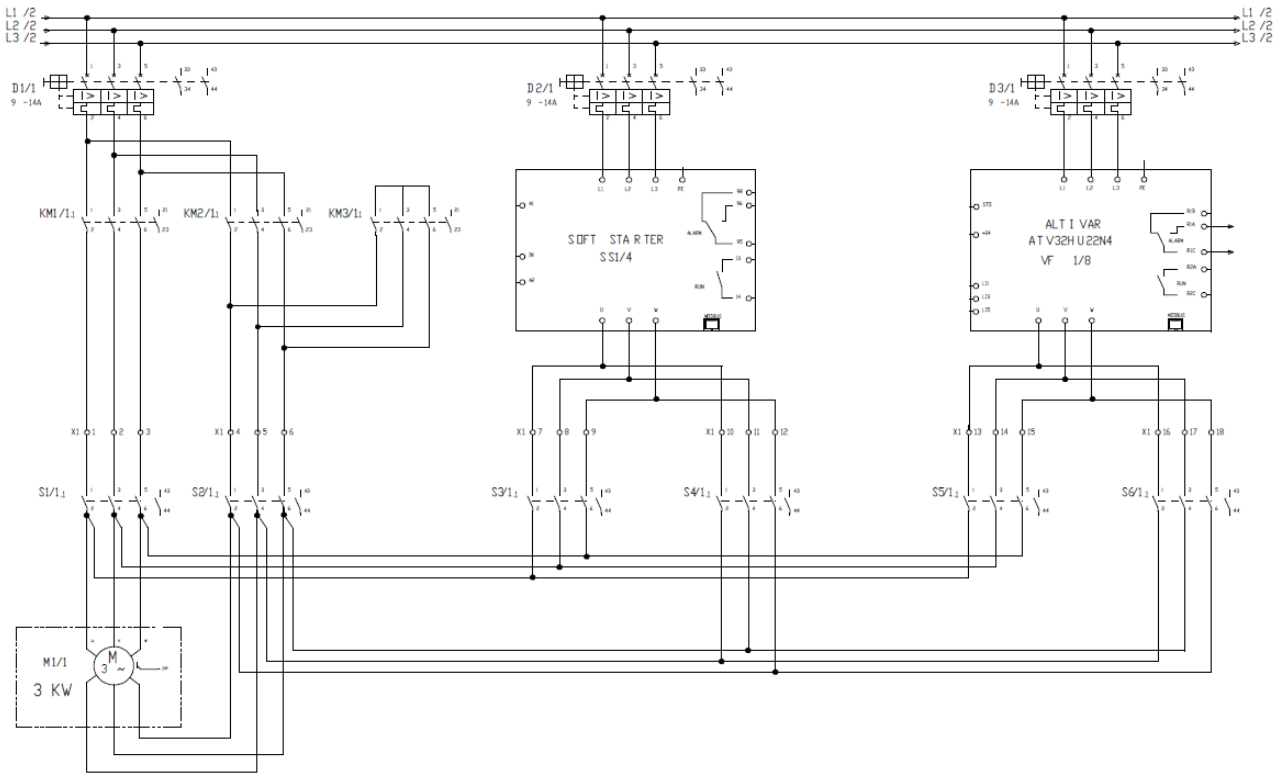
Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

На фиг. 4 е представена принципна електрическа схема на разработения стенд.

Програмата за работа е създадена с приложен софтуер на фирмата ”SIEMENS” – TIA Portal V20 [4].

За реализиране на автоматизация на системата за управление е използван програмируем логически контролер ”SIEMENS” SIMATIC S7-1200. Устройството представлява компактен програмируем логически контролер, който отговаря на всички изисквания чрез подобрени възможности за производителност, съчетаващ мощна функционалност с пестящ пространство дизайн. В допълнение SIMATIC S7-1200 притежава:

- повишена производителност и мащабируемост, увеличена изчислителна мощност, разширена памет за програми и данни,.
- високоефективен контрол на движението, интегрирани функции за управление на движението;
- вграден протокол Profi Safe за комуникация с честотни преобразуватели [5].



***Фиг. 4**. Част от реализираната програма за управление*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стендът нагледно представя основните методи за управление на АДНСР – схема звезда-триъгълник, пускане и спиране на електродвигателя чрез софтстартер и регулиране на честотата на въртене чрез промяна честотата на захранващото напрежение. По този начин могат да бъдат постигнати различни по вид изкуствени характеристики, отговарящи най-точно на работата

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

на двигателя при различни работни режими.

Внедряването на програмируем логически контролер (PLC) позволява реализиране на напълно автоматизиран процес, както и мониторинг и контрол на отделните етапи от програмата за работа. Целият процес на управление е изпълнен в съответствие с изискванията за сигурна и надеждна работа в експлоатационни условия. Това позволява по-бързо отстраняване на проблеми и неизправности, повече информация за състоянието на двигателя, по-добър контрол за използване на максималните работни способности на АДНСР.

За по-добра и нагледна визуализация на процесите, засегнати в макета, е използван и софтуер за визуализация ”WINCC” на ”Siemens” [6], с приложена SCADA система.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ЛИТЕРАТУРА

[1]. Инженериг ревю, TLL Media, 9/2021. // Inzhinerin revyu, broi 9/2021. https://www.engineering-review.bg/

[2]. https://scada.bg

[3]. https://support.industry.siemens.com

[4]. https://www.siemens.com

[5].https://contentpath.siemens.com/ens71200g2-migration/migration-s7-1200-g2

[6].https://www.siemens.com/bg-bg/products/scada/wincc-v8/

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

СИМУЛАЦИОННО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕФЕКТИВНОСТТА НА ХИБРИДНА ТОПЛИННА СИСТЕМА ПРИ РАЗЛИЧНИ КЛИМАТИЧНИ ЗОНИ

EFFICIENCY SIMULATION OF A HYBRID THERMAL SYSTEM IN DIFFERENT CLIMATIC ZONES

Nadezhda Vasileva
Technical University of Sofia, Plovdiv Branch, Dept. of Mechanics,25 Tsanko Diustabanov Str, 4000 Plovdiv, Bulgaria, nvasileva@tu-plovdiv.bg
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract
This paper presents a simulation study of the efficiency of a hybrid heating system operating under different climatic conditions in Bulgaria. The investigated system consists of solar collectors, a water-to-water heat pump, a fan coil unit, a vertical heat exchanger and water storage tanks. The hybrid system operates in five main operating modes, including charging and discharging processes. The aim of the study is to evaluate the coverage coefficient of the system and to perform a comparative analysis for five Bulgarian cities with different climatic characteristics. The simulations were carried out using the commercial software TRNSYS. The obtained results demonstrate that climatic conditions have a significant influence on the system efficiency and its ability to cover the heating demand in different regions of Bulgaria.

Keywords: Simulation, TRNSYS, coverage coefficient, hybrid heating system.

INTRODUCTION

Global efforts to combat climate change and reduce carbon emissions are the main reasons for developing sustainable heating solutions and increasing energy efficiency worldwide. Environmentally sustainable and energy-efficient heating systems are of utmost importance, because as urbanization increases, energy needs grow. More and more departures show the pressing need to reduce energy consumption and use renewable energy sources [1].

Hybrid thermal systems, which combine different heating and cooling technologies, offer significant advantages in this context, combining the efficiency of renewable sources with the reliability of conventional technologies. For example, studies on solar collectors and heat pumps show significant potential for reducing energy costs and greenhouse gas emissions [2, 3].

The hybrid heat system described in the article combines solar collectors, a water-water heat pump, tanks of different capacities, a vertical heat exchanger and a convector. Each component of which the system is built has an important role in increasing the energy efficiency of the system as well as improving reliability. With abundant solar radiation, it is possible to significantly reduce energy consumption by using solar collectors [4].

The aim of the present study is to simulate the performance of a hybrid heating system in different climatic zones, evaluating

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

its advantages and disadvantages in the context of different climatic conditions. The methodology involves the use of computer simulations to analyze the thermal efficiency and economic benefits of different system configurations in different climate zones. This includes modeling thermal processes and evaluating energy savings and emission reductions.

SYSTEM COMPONENTS

The system is made up of solar collectors, a single vertical heat exchanger, a water-to-water heat pump, a convector, a 150l buffer, 200l and 300l water tanks connected in a common scheme, it has the possibility to work in five modes of operation: three for charging and two for discharging. Manual switching is used to switch from one mode to another. The hybrid heating system is in "Renewable Energy Source" Laboratory at the Technical University of Sofia's Plovdiv branch [5, 6]

GENERAL SCHEME OF THE HYBRID HEAT SYSTEM OPERATING IN THE FIVE OPERATING MODES

The simulation of the hybrid thermal system was performed using the commercial software TRNSYS. The figure 1 show a hybrid heating system that can work in five modes of operation. Two of the modes of operation are for charging energy. Charging the water tanks with thermal energy from the solar collectors and charging the vertical heat exchanger with thermal energy is used. The other three modes are used for discharge. The discharge of the system is used by direct solar heating, through-source heat pump heating and solar-based heat pump heating. A hybrid heating system could operate in both heating and cooling modes, but only the heating mode is discussed in the current paper. The switching between the five operating modes is done by a component type 11, and two sub-types of the component, namely type 11h and type 11f, are used in the simulation scheme.

One more component is of particular interest in the compilation of a simulation scheme of the hybrid thermal system this is a component type 109. Through component type 109, real climatic features will be introduced into the system and thus the thermal characteristics will be investigated. This component is used by the simulation to "read" weather data. This data is fed to the component at regular time intervals preset by the user. The data thus obtained is converted to a desired system of units of measurement and the data obtained for the solar radiation is processed to obtain the radiation on the inclined surface and the angle of incidence on any number of surfaces. Meteorological data is supplied to the component in the standard TMY2 format generated by the Metronome program. In the simulation of the hybrid heating system, meteorological data for five cities in Bulgaria, taken from the Metronome program, were used [9, 10]

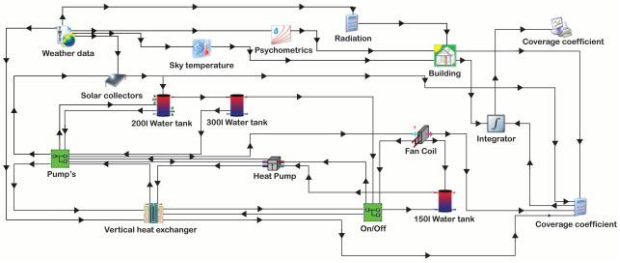


Fig.1. *The structure of system in the TRNSYS*

The components used in the simulation of the hybrid heat system are: Flat solar collectors – Type 1, Buffer tank 150l – Type 4, Solar water heater 200l – Type 4, Water tank 300l – Type 4, Single vertical heat exchanger – Type 557, Convector – Type 670, Water-to-water heat pump – Type 668, Pumps – Type 3, Real Weather Data Input Component – Type 109, Effective sky temperature – Type 69, Dry thermometer and relative humidity – Type 33, Building – Type

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

56, Flow control – Type 11 and Integrator – Type 24.

CALCULATION OF THE COVERAGE COEFFICIENT OF THE SYSTEM

The coverage coefficient is used to evaluate how well the system manages to absorb resources such as solar energy, heat exchange processes, etc. By absorbing more of the resources, the aim is to support the heating process. The coverage coefficient refers to how much of the total heat needed to heat a given space can be obtained from a hybrid heating system.

This scientific study focuses on the coverage coefficient of hybrid thermal systems, an essential parameter for assessing their efficiency and performance. The coverage coefficient represents the fraction of total heating demand met by the hybrid system over a specific period. The study examines how variations in climatic conditions, geographical locations, and system components impact the coverage coefficient [1]. Using simulation techniques with TRNSYS software, the coverage coefficient is analysed across different climatic zone in Bulgaria. The findings provide valuable insights into the effectiveness of hybrid thermal systems under diverse environmental conditions, aiding in their optimization and design for enhanced energy efficiency [11].

The coverage coefficient can be calculated using the following equation:

$$\bar{Q} = \frac{\int_z^{\square} Q_{uh}(z)}{\int_z^{\square} Q_{hl}(z)} \qquad (1)$$

where:

Quh(z) - The extracted and utilized heat from the corresponding element of the system as a function of time z, [J]

Qhl(z) - The heat load of the consumer to be covered as a function of time z, [J]

As an efficiency indicator, the coverage factor assesses how well the system manages to use the available resources - such as solar energy, heat exchange potential and others - to support the heating process. A higher coverage factor indicates that the system can cover more of the heat needs of the space it serves and is therefore more efficient. This measure is useful in the design and evaluation of hybrid thermal systems as it allows engineers and designers to determine potential energy benefits and to optimize system configuration and operating parameters for greater efficiency. The coverage factor values range from 0 to 1, reaching a value of 1 is the maximum value. This means that because of the operation of a certain component, the energy needs of the entire installation are covered, but this would be disadvantageous from an economic point of view.

The simulated system has the same components but placed in different cities in Bulgaria with different climatic features. Climatic features are entered via component type 109 in standard TMY2 format generated by the Meteonorm program.

In this study, the system operates in heating mode during the months from October to March, when there is a need for heating in Bulgaria. The cities that have been chosen are in Sofia, Plovdiv, Varna, Pleven and Sandanski, each city is in different climatic conditions in Bulgaria.

REPRESENTATION OF SIMULATION RESULTS FOR EACH CITY

This part of the article presents the results obtained from the simulation study of the system for each of the presented five cities in Bulgaria.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

The total chart data of each research city has a duration of τ= 8760 [h] or it can be said that h=356 [d], the time intervals for recording the data is Δτ=1[h]. Only the months of the heating season are considered. During the rest of the year, the coverage coefficient is not calculated and, accordingly, in the charts it has a value of 0, because then the system is turned off and does not work.

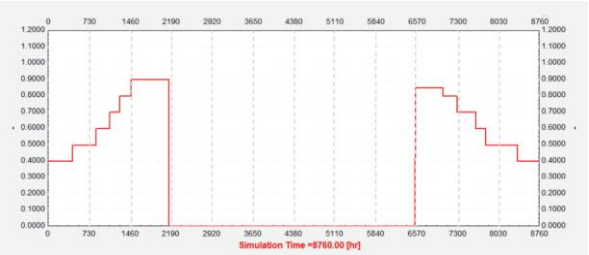


Fig.2. *Coverage coefficient of the system for the city of Sofia for one calendar year*

From the presented diagram of the coverage coefficient referring to the hybrid heat system located in the city of Sofia, presented in fig. 2. the following conclusions can be drawn:

- The initial value of the coefficient presented in the diagram in October shows that it reaches a value of 0.85, which indicates that the heating system is effective in more favorable climatic conditions. During the coldest period of the study, which is at the end of December, a decrease in the coefficient to 0.4 is seen, this is due to lower temperatures and weak solar radiation. After that, the results of the coefficient from the diagram gradually increase, reaching 0.9 in March.

- The performance of the hybrid thermal system, composed of all its components, under the less favourable winter conditions in Sofia, can be effective in providing the necessary warmth for the building throughout the heating season, despite temporary challenges during the colder periods. It is considered more reliable than the system installed in Pleven, despite the relatively similar values.

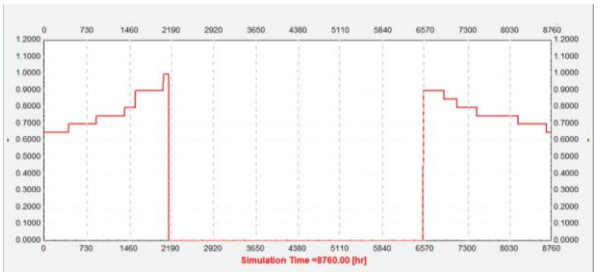


Fig.3. *Coverage coefficient of the system for the city of Plovdiv for one calendar year*

From the presented diagram of the coverage coefficient referring to the hybrid heat system located in the city of Plovdiv, presented in fig. 3. the following conclusions can be drawn:

- This diagram shows the high coverage coefficient at the beginning of the heating season, with its values reaching 0.9. This shows the effective operation of the hybrid heating system in the climatic conditions of the city of Plovdiv. By the end of the heating season, the coefficient values reach 1, which is actually evidence of the successful adaptation of the system to variable external conditions and the ability to provide the necessary amount of heat for the entire period.
- The overall analysis shows that the heating system is both effective and reliable, capable of meeting the heating demands during the heating season in Plovdiv, ensuring comfort and low costs.

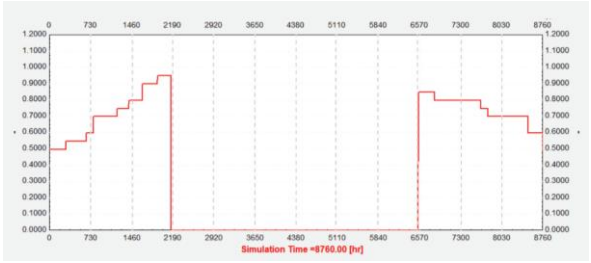


Fig.4. *Coverage coefficient of the system for the city of Varna for one calendar year*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

From the presented diagram of the coverage coefficient referring to the hybrid heat system located in the city of Varna, presented in fig. 4. the following conclusions can be drawn:

- The initial coverage coefficient in October reaches a value of 0.85, which indicates effective operation of the heating system under the climatic conditions of the city of Varna. When the coldest period occurs at the end of December and the beginning of January, a decrease in the coefficient to a value of 0.5 is observed, due to lower outdoor temperatures and reduced duration of sunlight. Subsequently, a gradual increase in the values is recorded during the heating season, and in March the coefficient reaches 0.95, which indicates the ability of the system to operate effectively even under less favorable climatic conditions.

- The overall analysis shows that the heating system is effective in combining its components and is also reliable, able to cope with the variable climatic characteristics of Varna during the heating season.

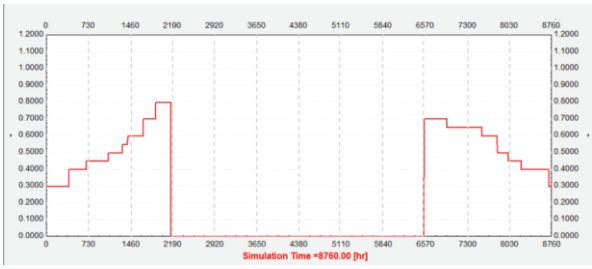


Fig.5. *Coverage coefficient of the system for the city of Pleven for one calendar year*

From the presented diagram of the coverage coefficient referring to the hybrid heat system located in the city of Pleven, presented in fig. 5. the following conclusions can be drawn:

- The initial values of the coverage coefficient in October reach 0.7, which is an indicator of lower efficiency of the heating system in the climatic conditions of the city of Pleven. Then the values during the coldest period in late December and early January are presented, with a significant decrease in the coefficient to 0.3, which is due to the lower external ambient temperatures and reduced solar radiation. In the second half of the heating season, a gradual increase in the values is recorded, with the coefficient reaching 0.8 in March. The results show that even in less favorable climatic conditions, the hybrid heating system retains its ability to provide the necessary amount of heat during the heating season.

- Compared to the other cities studied in the dissertation, the coverage coefficient values in Pleven are the lowest, indicating that the system does not operate efficiently enough in this part of Bulgaria.

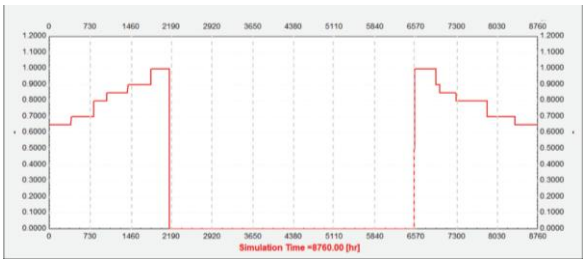


Fig.6. *Coverage coefficient of the system for the city of Sandanski for one calendar year*

From the presented diagram of the coverage coefficient referring to the hybrid heat system located in the city of Sandanski, presented in fig. 6. the following conclusions can be drawn:

- The values of the coverage coefficient at the beginning of the study in October reached a value of 1, which indicates a high efficiency of the heating system in the climatic conditions of the city of Sandanski. During the coldest period, the value decreases to 0.65, but remains relatively high enough throughout the heating season.

- The combination of favourable climatic conditions in Sandanski makes the system highly effective, providing ample heat during

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

the heating season. Compared to the other cities studied in the dissertation, the coverage coefficient values in Sandanski are the highest, indicating that the system operates most reliably in this part of Bulgaria.

CONCLUSIONS

Simulations of the efficiency of the hybrid thermal system were conducted using the commercial software TRNSYS and its sub-program TRNBuild across various climatic zones in Bulgaria. This represents a critical aspect of the research. Despite the system comprising identical components in each city, the simulation data revealed variations in efficiency and consequently in the system's ability to meet energy demands across different regions of the country. The findings indicate that the coverage coefficient values were highest in Sandanski and lowest in Pleven.

The data from these simulations suggest the potential for optimizing the system's performance. This analysis is crucial for understanding the applicability of hybrid thermal systems in different climatic conditions. The results, gathered over a heating season of six consecutive months, demonstrate strong performance in terms of the coverage coefficient, which underscores the adequacy and effectiveness of the model and the carefully selected system components.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research is funded by the European Regional Development Fund under the Programme "Research, Innovation and Digitalisation for Smart Transformation" 2021–2027, Project No. BG16RFPR002-1.014-0005, Competence Centre "Intelligent Mechatronic, Eco- and Energy-Saving Systems and Technologies".

REFERENCES

[1] Atmaca, A., Atmaca, N. "Energy efficiency and engineering applications" in conjunction with the "International energy and engineering conference 2016" (Oct 13–14, 2016). Energ. Ecol. Environ. 3, 1–4 (2018). https://doi.org/10.1007/s40974-018-0082-2

[2] Jiao, H., He, X., & Ali, S. S. (2024). A critical review on sustainable biorefinery approaches and strategies for wastewater treatment and production of value-added products. Energy, Ecology and Environment, 9(1), 1-24.

[3] Kiselev, A., Magaril, E., & Karaeva, A. (2023). Environmental and economic efficiency assessment of biogas energy projects in terms of greenhouse gas emissions. Energy, Ecology and Environment, 9(1), 68-83.

[4] Sudhakar, M. P., Arunkumar, K., & Mathimani, T. (2023). (Re)-thinking the red seaweed biomass for biofuel production to meet sustainable development goals toward circular bioeconomy. Energy, Ecology and Environment, 9(1), 42-57.

[5] E. T. Toshkov. Investigation of a Hybrid System with Ground Source Heat Pump and Solar Collectors, PhD Thesis, Technical university of Sofia, Plovdiv Branch, 2015 (in Bulgarian).

[6] TOSHKOV E., Build-up of hybrid installation with ground source heat pump and solar collectors. Technical university Varna Edition, Thermo techniques, year 4, book 2, 2013, ISSN 1314-2550, pp. 24-27

[7] Li, Z., et al. (2019). "Modeling and control of building energy systems: Grey-box and hybrid models." Energy, Ecology and Environment, 4(2), 55-65.

[8] Zhang, T., & Zhao, X. (2020). "Analysis of thermal performance in building energy systems using grey-box modeling." Energy, Ecology and Environment, 5(3), 90-102.

[9] Klein SA, Beckman WA, Mitchell JW, Duffie JA, Duffie NA, Freeman TL, et al. TRNSYS 16 – a transient system simulation program. Madison, USA: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin; June 2006.

[10] TRNSYS 16, Volume 5, Mathematical Reference

[11] C. -P. Chen et al., "A Hybrid Memetic Framework for Coverage Optimization in Wireless Sensor Networks," in IEEE-Transactions on Cybernetics, vol. 45, no. 10, pp. 2309-2322, (Oct. 2015)

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

МОНИТОРИНГ НА ПАРАМЕТРИ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА МРЕЖА В УНИВЕРСИТЕТСКА СГРАДА С ФОТОВОЛТАИЧНА ЦЕНТРАЛА

MONITORING OF ELECTRICAL GRID PARAMETERS IN A UNIVERSITY BUILDING WITH A PHOTOVOLTAIC POWER PLANT

Ivaylo Stoyanov[1,2], Plamen Tsankov[1,2], Milko Yovchev[1,2*], Hristo Ibrishimov[1,2], Ivaylo Lazarov[1,2], Mihail Kovachev[1]
[1]*Technical University of Gabrovo*
[2]*Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"*
[*]Corresponding author*: myovchev@tugab.bg*

Abstract
This paper presents the results of monitoring electric power quality parameters in the electrical grid of an educational building equipped with photovoltaic power plants. The measurements were carried out in the distribution board of the photovoltaic system using a power quality analyzer and its specialized software. The monitoring results are presented in both tabular and graphical form. A comparative analysis of the measured electrical parameters against the applicable European regulatory requirements was also performed.

Keywords: monitoring; power quality analyzer; voltage drops; deviations of supply voltage; harmonics; photovoltaic power plant; electrical grid; flicker severity.

ВЪВЕДЕНИЕ

Технико-икономическите показатели на потребителите на електрическа енергия, както и сигурността на електрозахранването се осигуряват от качеството на електрическата енергия [1,2,3]. Качеството на електрическата енергия представлява група от количествени характеристики на електрическата мрежа, които се дефинират и ограничават от нормативните документи [4,5,6]. Нормативни изисквания към параметрите на захранващото напрежение на електрическата мрежа за променлив ток и методите за измерване са посочени в БДС EN 50160:2023. У нас стопанските потребители заплащат и надбавка върху стойността на електрическата енергия, ако за всеки 15-минутен интервал на отчитане факторът на мощността е по-малък от 0,90. Допълнително се заплаща и количеството отдадена (капацитивна) реактивна енергия в електрическата мрежа [7].

От изложеното по-горе следва, че при оценка на качеството на електрозахранването и оптимизиране на разходите за заплащане на електрическа енергия в сгради с инсталирани на покрива фотоволтаични електроцентрали (ФЕЦ) за собствени нужди е необходимо да се извършва мониторинг и анализ на параметрите на електрическата мрежа.

В настоящия доклад се представят резултати от мониторинг на параметри на електрическата мрежа в Корпус 3 на Технически университет – Габрово – Ректорат, с инсталирана на покрива фотоволтаична електроцентрала.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

ИЗЛОЖЕНИЕ

Разположената на покрива на университетската сграда ФЕЦ има максимална (пикова) мощност 23,32 kWp. Тя се състои от две системи с фотоволтаични (PV) модули от поликристален силиций pSi (2×3,33 kWp - фиг. 1а), една система с PV модули от аморфен силиций aSi (3,33 kWp - фиг. 1б) и четири системи със силициеви модули от N-тип (10 kWp - фиг. 1в).

а) *Система с PV модули от pSi*

б) *Система с PV модули от aSi*

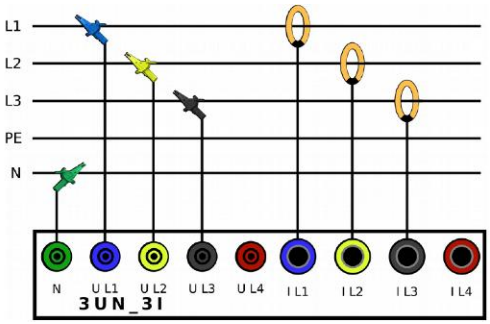
в) *Система с PV модули от N-тип*

Фиг. 1. *ФЕЦ на покрива на сградата*

Произведената от ФЕЦ електрическа енергия, посредством синусоидални инвертори, се отдава към разпределителното табло (РТ) в университетската сграда и се използва за собствени нужди. Ограничаването на произвежданата електрическа енергия от ФЕЦ се реализира посредством токови трансформатори, в зависимост от товаровия график на сградата. По този начин се предотвратява отдаването на електрическа енергия към захранващата електроразпределителна мрежа.

Измерването и мониторинга на електрическите параметри на университетската сграда се извършват с електроенергиен анализатор PLA44 RGP (BMR trading), закупен по Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатрони, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

Електроенергийният анализатор се свързва към електрическата мрежа от система на заземяване тип TN-C-S (фиг. 2). Електрическата връзка на анализатора с разпределителното табло на сградата, към което е свързана ФЕЦ, е показана на фиг. 3. Връзката се осъществява чрез напреженови сонди и гъвкави намотки, тип Роговски, с измервателен сигнал към токовите входове – 100 mV за 1 kA при честота 50 Hz [8].



Фиг. 2. *Връзка към система TN-C-S*

Фиг. 3. *Свързване на анализатора към РТ*

Конфигурацията и настройките на анализатор PLA44 RGP се извършват в специализиран софтуер PMS client application (Power Monitoring Software). В процеса на конфигурация, в режим на запазване на данни, предварително се създава профил за измерване, съвместим със стандарт EN

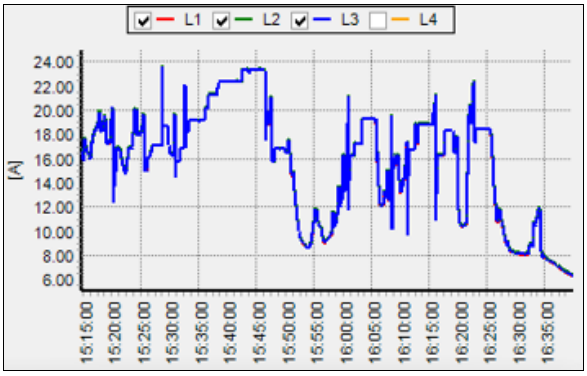
Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

50160, и се избират допълнителни параметри, необходими за оценка на качеството на електрическата енергия [4].

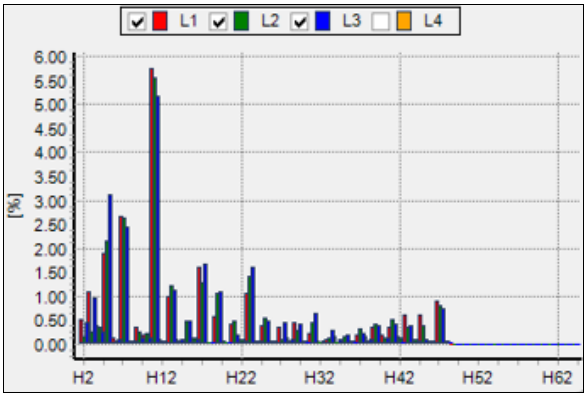
Измерват се следните параметри: честота f, изменение на напрежението δU, спад на захранващото напрежение, кратки и продължителни прекъсвания, несиметрия, продължително въздействие на пулсациите P_{lt}, висши хармоници на напрежението ($U_{h2} \div U_{h64}$), общо хармонично изкривяване по напрежение THD_U, електрически ток, висши хармоници на тока ($I_{h2} \div I_{h64}$), общо хармонично изкривяване по ток THD_I, активна P и пълна S мощност, $cos\ \varphi$ и фактор на мощността PF. Интервалът на отчитане на параметрите се съобразява с посочени в нормативните документи методи за измерване и е различен за различните параметри. Например, средната стойност на честотата се отчита за 10 s, а изменението на напрежението се отчита като средни 10-минутни ефективни стойности [4]. Съгласно изискванията на [4] измерването на електрическите параметри трябва да обхваща период от една седмица. Измерванията се извършват в периода от 15.07.2025 г. (17:30 ч.) до 23.07.2025 г. (17:30 ч.).

Мониторингът на измерваните и записваните параметри се осъществява чрез FTP сървър и комуникация през специализирания софтуер PMS client application, а данните от създадения профил на измерване се експортират от анализатора към компютър чрез USB [8].

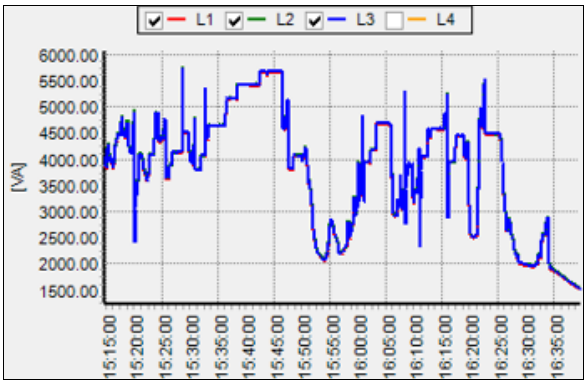
На фиг. 4 са показани резултати от 90-минутен мониторинг на електрическия ток, висшите хармоници на тока и пълната мощност на трите фази (L1, L2 и L3) от електрическата мрежа. Мониторингът се осъществява в специализирания софтуер към електроенергийния анализатор PLA44.



а) *Електрически ток на фази L1, L2 и L3*



б) *Висши хармоници на електрическия ток за фази L1, L2 и L3*



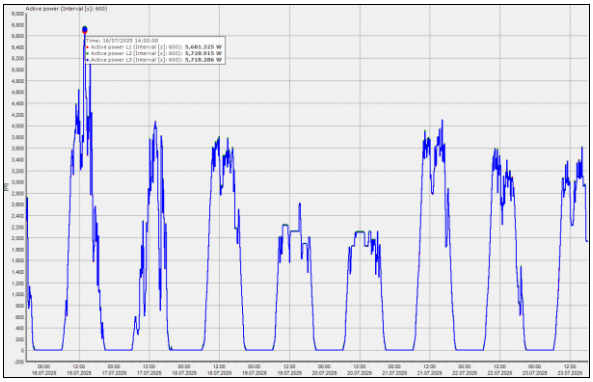
в) *Пълна мощност на фази L1, L2 и L3*

Фиг. 4. *Мониторинг на част от параметрите на електрическата мрежа*

По време на работа на фотоволтаичната електроцентрала през деня се установява, че $cos\ \varphi \approx PF \approx 1$, а общото хармонично

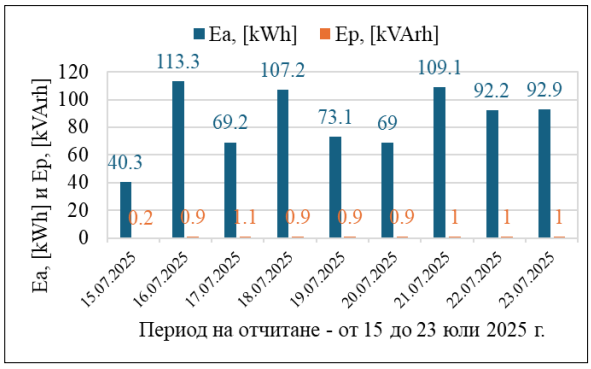
Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

изкривяване по ток е THD_I < 10 % (фиг. 12а). На фиг. 5 е представено изменението на отдаваната активна мощност от ФЕЦ към разпределителното табло на университетската сграда за изследвания период на мониторинг.



Фиг. 5. *Отдавана активна мощност от ФЕЦ към университетската сграда*

За същият период се установява, че произведената и отдадена към сградата активна електрическа енергия от ФЕЦ е 766,3 kWh, а използваната реактивна електрическа енергия е 7,9 kVArh. Разпределението на активната и реактивната електрическа енергия по дни е представено на фиг. 6.



Фиг. 6. *Произведена от ФЕЦ и отдадена към сградата електрическа енергия по дни*

В табл. 1 са представени резултати от съответствие между нормативните изисквания за характеристики на напрежението на електрическата мрежа по БДС EN 50160 и измерените стойности в разпределителното табло на сградата за изследвания период. Подчертаните стойности не съответстват на изискваните.

Табл. 1. *Сравнение на измерените стойности на характеристиките на напрежението с нормативните изисквания*

Нормативно изискване за характеристиката на захранващото напрежение		Измерена стойност
Честота на електрическата мрежа f, [Hz]		
За 99,5 % от седмицата – в интервал (49,5 ÷ 50,5) Hz		49,9 ÷ 50,1
За 100 % от седмицата – в интервал (47÷ 52) Hz		49,9 ÷ 50,1
Изменение на напрежението δU, [V]		
За 95 % от седмицата – в интервал (207 ÷ 253) V	L1	237,3 ÷ 244,6
	L2	238,4 ÷ 244,3
	L3	238,1 ÷ 244,1
За 100 % от седмицата – в интервал (195,5 ÷ 253) V	L1	234,1 ÷ 245,6
	L2	235,5 ÷ 246,4
	L3	235,0 ÷ 245,8
Коефициент на несиметрия по напрежение α_U, [%]		
За 95% от седмицата $\alpha_U \leq 2\%$		0,46
Продължително въздействие на пулсации P_{lt}		
За 95 % от седмицата – $P_{lt} \leq 1{,}0$	L1	1,1
	L2	0,5
	L3	0,7
Спад на захранващото напрежение		
Спад на захранващото напрежение с продължителност < 1 s с дълбочина < 60 %.		Отчетен на две фази за 0,09 s: L1 – 136,47 V L3 – 120,34 V

В табл. 2 е показано сравнение между допустимото по БДС EN 61000-2-2:2004 и измереното на трите фази общо хармонично изкривяване по напрежение THD_U за изследвания период. Измерените и осреднени 10-минутни относителни напрежения на поредните номера висши хармоници не превишават допустимите, посочени в [5,6].

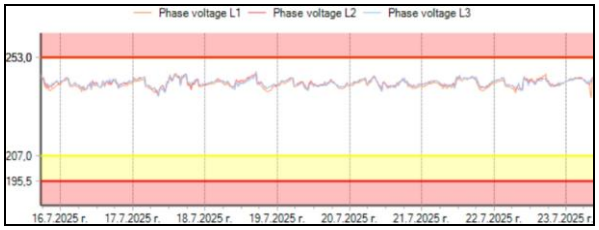
Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Табл. 2. *Допустимо и измерено общо хармонично изкривяване по напрежение THD_U*

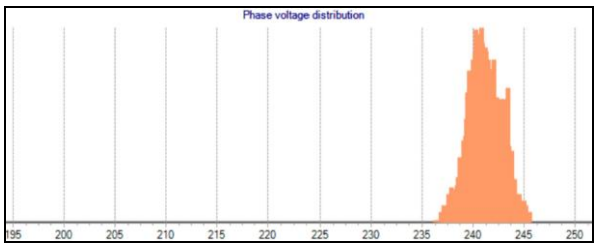
Нормативно изискване	Измерена средна стойност, [%]		
$THD_U < 8$ %	L1	L2	L3
	1,85	1,92	1,81

От фиг. 7 до фиг. 10 за изследвания период на мониторинг на електрическата мрежа са представени в графичен вид изменението на честотата f в [Hz], изменението на напрежението U на трите фази във [V], хистограма на фазовото напрежение и изменението на показателя дълготрайно въздействие на пулсациите P_{lt} на трите фази.

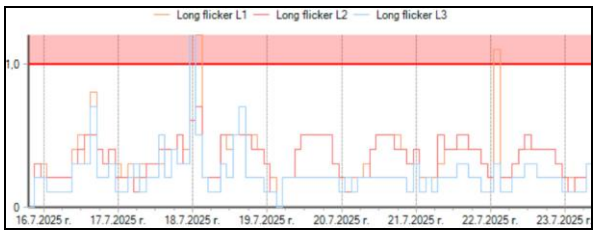
Фиг. 7. *Изменение на честотата*



Фиг. 8. *Изменение на фазовото напрежение*



Фиг. 9. *Хистограма на фазовото напрежение*

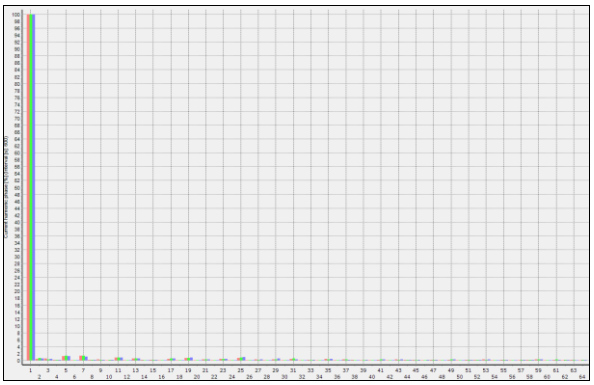


Фиг. 10. *Изменение на показателя P_{lt}*

Регистрираният спад на захранващото напрежение на фази L1 и L3 е в интервала от 19:19:36.930 ч. до 19:19:37.020 ч. на 17.07.2025 г. – с продължителност 90 ms, и е показан графично на фиг. 11.

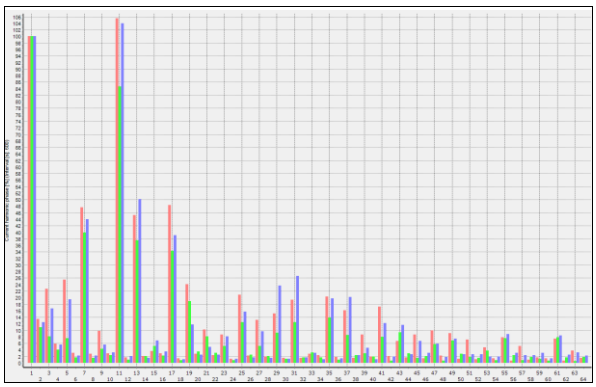
Фиг. 11. *Моментни стойности на захранващото напрежение при спад на фази L1 (червено) и L3 (синьо)*

На фиг. 12 са представени осреднени 10-минутни стойности на висшите хармоници на тока за трите фази при два различни експлоатационни режима на синусоидалните инвертори на ФЕЦ на 18.07.2025 г. – в установен режим на натоварване и голяма производителност на централата (в 12:00 ч. – фиг. 12а), както и във вечерен преходен режим в 20:40 ч. (фиг. 12б), непосредствено преди автоматичното изключване на инверторите от електрическата мрежа в 21:00 ч.



а) *В установен режим на натоварване*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие



б) В преходен режим при изключване
***Фиг. 12.** Висши хармоници на тока*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В резултат на извършения мониторинг на параметрите на електрическата мрежа с електроенергиен анализатор в университетска сграда с инсталирана фотоволтаична централа могат да се направят следните по-съществени заключения:

- Произвежданата активна електрическа енергия от ФЕЦ се определя от товаровия график на сградата и за изследвания период нейната стойност е 766,3 kWh, а стойността на реактивната електрическа енергия е 7,9 kVArh – 1,03 % от активната (фиг. 6);
- Измерените стойности на характеристиките на захранващото напрежение съответстват на нормативните изисквания по БДС EN 50160 за период от една седмица, с изключение на дълготрайното въздействие на пулсациите на фаза L1 (табл. 1), което е над допустимата стойност. Регистрираните стойности на показателя изменение на напрежението са по-високи от 230 V (фиг. 9), но интервалът на изменение е в допустимите граници;
- Регистриран е спад на захранващото напрежение на две от фазите – L1 и L3, с продължителност 90 ms (фиг. 11);
- Режимът на натоварване на инверторите оказва съществено влияние върху висшите хармоници на тока – те са значителни в преходните режими на включване и изключване (фиг. 12б) и много ниски в установен режим на натоварване през деня (фиг. 12а) и след изключване на инверторите.

Получените резултати от мониторинга на показателите за качеството на електрическата енергия и извършеният сравнителен анализ потвърждават целесъобразността на проведените измервания.

Благодарности

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ildarabadi R., M. Zadehbagheri, New Technology and Method for Monitoring the Status of Power Systems to Improve Power Quality – A Case Study, MDPI, Processes, Vol. 11 (8), 2023, ISSN 2227-9717.
[2] Fernandes R., et. al., A Retrofit Strategy for Real-Time Monitoring of Building Electrical Circuits Based on the SmartLVGrid Metamodel, MDPI, Energies, Vol. 15 (23), 2022, ISSN 1996-1073.
[3] Du W., C. Huang, Y. Zhu, L. Wang, Advancements in Power Quality Analysis for Electrical Distribution Networks, 9th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), IEEE, Shanghai, China, 2024, p. 874-878, ISBN 979-8-3503-0963-8.
[4] BDS EN 50160:2023 - Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks.
[5] BDS EN 61000-2-2:2004 - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-2: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems.
[6] Tsankov P., Electric Power Distribution, “Vasil Aprilov” press, TU-Gabrovo, 2014, p. 151-154, ISBN 978-954-683-514-7.
[7] Tsankov P., M. Yovchev, Industrial Power Supply Systems, “Vasil Aprilov” press, TU-Gabrovo, 2025, p. 31-32, ISBN 978-954-683-723-3.
[8] BMR PLA44 RGP – Portable power quality analyzer class A, User and service manual.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

УПРАВЛЕНИЕ НА ФОРМАЦИИ ОТ АВТОНОМНИ МОБИЛНИ РОБОТИ: КОНЦЕПТУАЛЕН МОДЕЛ И АРХИТЕКТУРА

FORMATION CONTROL OF AUTONOMOUS MOBILE ROBOTS: CONCEPTUAL MODELING AND SYSTEM ARCHITECTURE

Vanya Markova **Ventseslav Shopov**
Institute of Robotics - Bulgarian Academy of Sciences
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Maya Dimitrova **Aleksander Krastev**
Institute of Robotics - Bulgarian Academy of Sciences
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract
This paper proposes an extended conceptual and architectural framework for formation control of autonomous mobile robots. It considers a multi-agent system in which the robots are required to maintain a predefined geometric formation, avoid obstacles and inter-robot collisions, and reach a target region in a two-dimensional environment. A formal model of the problem is proposed as a multi-agent Markov decision-making process with local observations, a shared policy, and centralized training with decentralized execution. The architecture includes an observation and communication layer, a formation manager, a decision-making layer, a safety layer, a low-level control layer, and an evaluation module. The proposed framework provides a foundation for subsequent implementation with ROS/Gazebo.

Keywords: formation control, autonomous mobile robots, CTDE, multi-agent systems, safe navigation, local observations

УВОД

Управлението на формации от автономни мобилни роботи е фундаментален проблем в областта на колективната роботика, многоагентните системи и кооперативното управление. Основната цел е група от роботи да се придвижва координирано в средата, като поддържа зададена геометрична структура, избягва препятствия и взаимни сблъсъци и достига целева област при наличие на ограничения върху сензорите, комуникацията и управлението.

Консенсусните методи моделират взаимодействията между агентите чрез комуникационен граф, матрица на съседство и Лапласиан, като позволяват анализ на сходимостта и координираното поведение на многоагентната система [6], [7], [8]. Подходите с изкуствени потенциални полета се използват широко за избягване на препятствия и реактивна навигация, но могат да бъдат чувствителни към локални минимуми и сложни геометрични конфигурации на средата [9].

През последните години дълбокото обучение с подкрепа се утвърждава като перспективен подход за синтез на политики за управление, които се обучават чрез взаимодействие със средата и оптимизация на наградна функция [1]. В този контекст ал-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

горитмите DQN, PPO и други actor--critic методи са използвани успешно в задачи за автономна навигация, вземане на решения и управление на роботи [3], [2] .

При многоагентни роботни системи особено важна е парадигмата централизирано обучение с децентрализирано изпълнение. Тази идея е в основата на редица съвременни многоагентни actor--critic архитектури, включително MADDPG и MAPPO [4], [5]. Предимството на CTDE подхода е, че съчетава стабилността на централизираното обучение с практическата приложимост на децентрализираното управление, което е съществено за реални роботни екипи с ограничена комуникация.

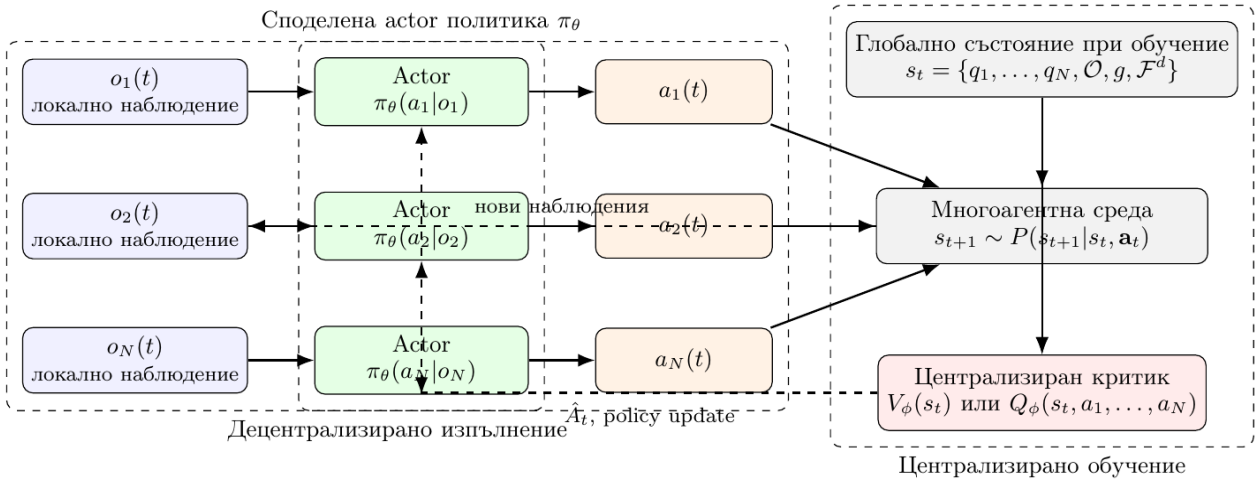
DRL политиките често трябва да се комбинират със слой за безопасност, формални ограничения или контролни бариерни функции, които ограничават опасните действия и намаляват риска от сблъсъци [10].

Целта на настоящата статия е да предложи разширен концептуален модел и архитектура на система за управление на формации от автономни мобилни роботи чрез дълбоко обучение с подкрепа.

Основните приноси на статията могат да бъдат обобщени по следния начин. Първо, предложен е концептуален модел на DRL-базирана система за формационно управление на автономни мобилни роботи. Второ, формулирана е модулна архитектура с ясно разграничение между интелигентен слой, слой за безопасност и изпълнителен слой. Трето, представена е CTDE постановка със споделена actor политика, локални наблюдения и централизиран critic. Четвърто, дефинирани са основни математически означения, наградна функция и метрики за оценка на формационната грешка, безопасността, успеваемостта и робастността. Пето, предложена е експериментална рамка за последваща реализация и валидиране чрез съвременни инструменти за обучение и симулация, като Stable-Baselines3, PettingZoo, Gymnasium, ROS и Gazebo [11], [12].

ИЗЛОЖЕНИЕ

Предложеният концептуален модел разглежда системата като йерархична структура, съставена от интелигентен слой, слой за безопасност и изпълнителен слой.



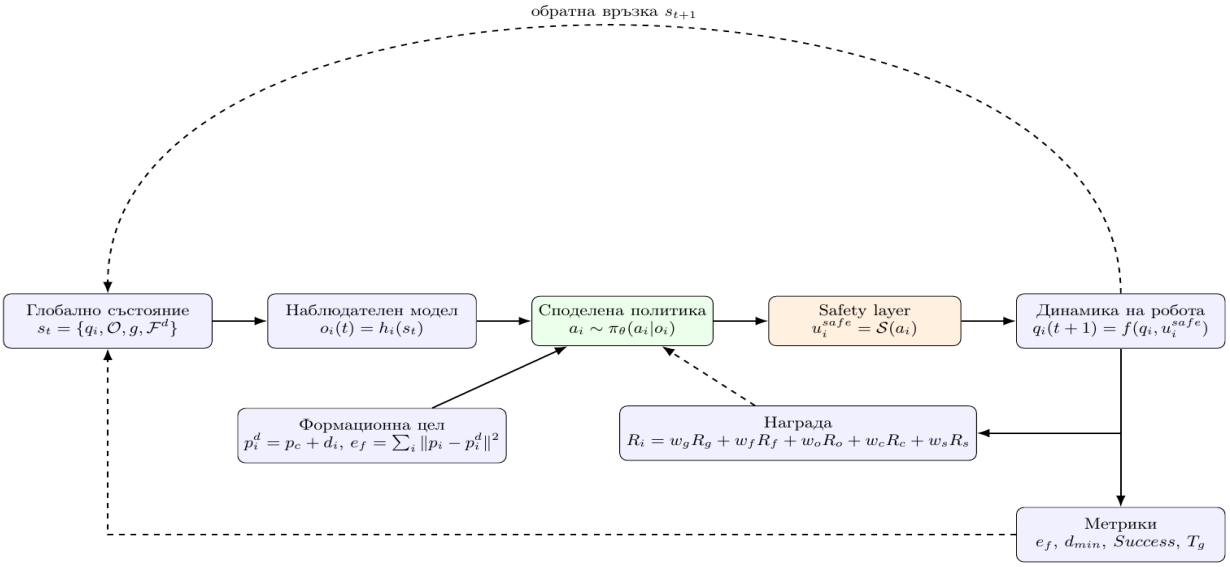
***Фиг. 1**. Концептуален модел на система за управление на формации от автономни мобилни роботи чрез дълбоко обучение с подкрепа.*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Интелигентният слой обработва локални наблюдения, комуникационна информация и желана формация. DRL политиката генерира управляващи действия, които се проверяват от слой за безопасност. Ниско ниво на управление преобразува безопасните команди в скорости или колесни команди, а екипът от роботи изпълнява движението в симулационна или реална среда.

Фиг. 1 представя основните функционални блокове. Предимство на тази организация е, че DRL политиката не се използва изолирано, а се поставя в архитектура с отделни механизми за формационна цел, безопасност, ниско ниво на управление и оценка. Това улеснява последващо разширяване към реални роботи, където ограниченията за безопасност са критични.

Архитектурата може да бъде описана чрез поток от информация от глобалното състояние към локалните наблюдения, действията, динамиката на роботите и обратната връзка за обучение.



***Фиг. 2**. Архитектура на DRL-базирана система за формационно управление с математически означения*

Фиг. 2 показва връзката между математическата постановка и програмната архитектура. Локалното наблюдение се получава чрез наблюдателен модел $h_i(s_t)$, политиката генерира действие, safety layer го преобразува в безопасна команда, а динамичният модел актуализира състоянието. Наградата и метриките формират обратната връзка за обучение и оценка.

Предложената архитектура има няколко предимства. Първо, тя разделя проблема на ясно дефинирани функционални модули, което улеснява реализацията, тестването и разширяването. Второ, използването на CTDE позволява стабилизиране на обучението чрез централизирана информация, без да се нарушава децентрализираният характер на изпълнението. Трето, safety layer намалява риска от опасни действия и създава възможност за комбиниране на DRL с формални ограничения. Четвърто, споделената политика улеснява мащабиране към различен брой агенти, особено ако локалните наблюдения са дефинирани чрез относителни позиции и графова структура

Ограниченията на подхода са свързани главно с трудността при проектиране на наградната функция, чувствителността към

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

параметри на обучението, потенциалния sim-to-real gap и необходимостта от достатъчно богата експериментална оценка.

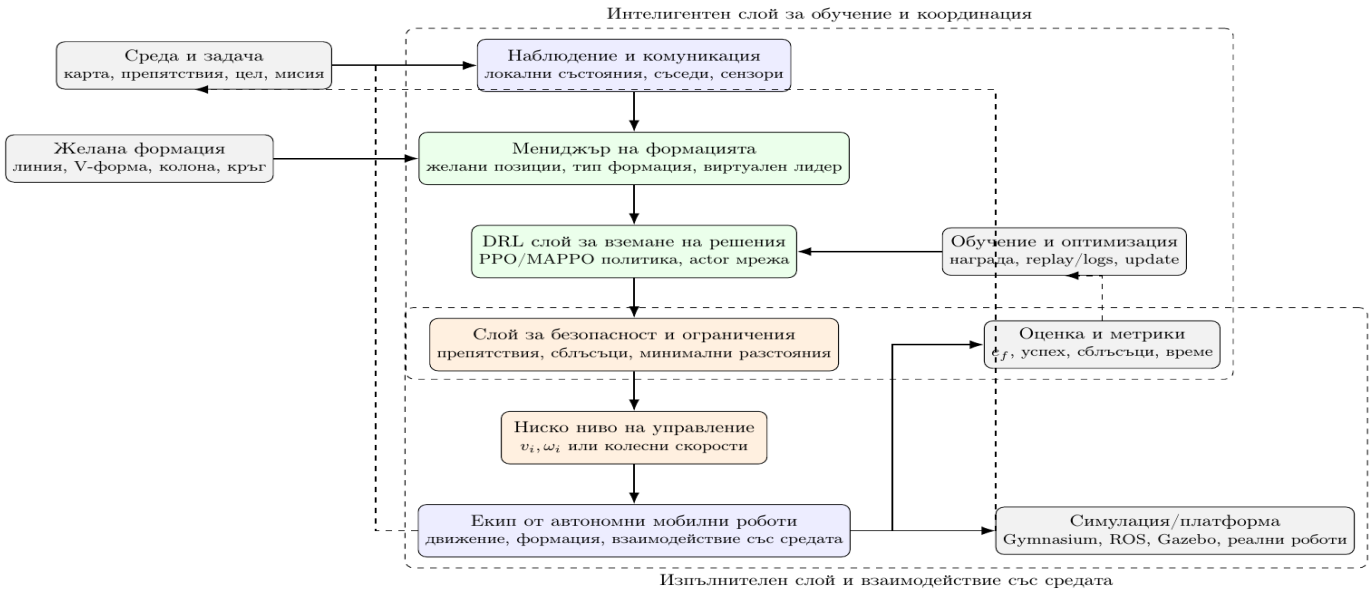
За реални приложения трябва да се отчетат шумове в сензорите, закъснения в комуникацията, ограничения на двигателите и несигурност в локализацията.

Диаграмата представя CTDE архитектура за многоагентно управление на формация от автономни мобилни роботи. Тя ясно разделя системата на два основни етапа: централизирано обучение и децентрализирано изпълнение.

В лявата част на схемата е показано децентрализираното изпълнение. Всеки робот разполага със собствено локално наблюдение. Това означава, че отделният агент не използва пълна информация за цялата система, а само данни, които може да получи от собствените си сензори, от локална комуникация със съседни роботи или от относителното си положение спрямо целта и формацията. Например локалното наблюдение може да съдържа собствената позиция и ориентация на робота, относителното положение на съседните агенти, информация за препятствията и отклонението от желаната позиция във формацията.

В централната лява част е показан блокът споделена actor политика. Това означава, че всички роботи използват една и съща обучена политика за вземане на решения. Въпреки че всеки агент получава различно локално наблюдение, правилото, по което се избира действието, е еднакво за всички. Това е важно предимство, защото намалява броя на параметрите на модела, улеснява обучението и позволява подобра мащабируемост при различен брой роботи.

Всеки actor приема локалното наблюдение на съответния робот и генерира действие за него. В контекста на мобилните роботи това действие обикновено може да бъде команда за линейна и ъглова скорост, команда за желана посока на движение или



Фиг. 3. *CTDE архитектура за многоагентно формационно управление: локални наблюдения, споделена actor политика и централизиран критик*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

корекция спрямо желаната позиция във формацията. Така първият робот генерира свое действие, вторият робот генерира свое действие и аналогично останалите роботи генерират индивидуални действия.

След това отделните действия се подават към многоагентната среда. Тази среда представлява симулационната или реалната роботна система, в която роботите се движат, взаимодействат помежду си, следват траектория, поддържат формация и реагират на препятствия. Средата приема съвместното действие на всички агенти и на тази база изчислява новото състояние на системата.

В дясната част на диаграмата е показан етапът на централизирано обучение. По време на този етап се използва глобално състояние на системата. То съдържа информация за всички роботи, препятствията, целевата точка и желаната формация. Тази глобална информация не е задължително достъпна при реално изпълнение, но по време на обучение тя се използва, за да се получи по-стабилна и по-информирана оценка на поведението на цялата група.

Под блока за глобалното състояние се намира многоагентната среда, която генерира нови наблюдения след изпълнение на съвместните действия. Тези нови наблюдения се връщат обратно към отделните агенти в лявата част на схемата. Така се затваря цикълът на взаимодействие: агентите наблюдават средата, избират действия, средата се променя и агентите получават нови наблюдения.

В долната дясна част е показан централизираният критик. Той е ключов компонент на CTDE архитектурата по време на обучението. Критикът има достъп до глобалното състояние и до съвместните действия на всички агенти. На тази основа той оценява качеството на текущото поведение на многоагентната система. Тази оценка се използва за изчисляване на сигнал за обучение, чрез който се актуализира споделената actor политика.

Пунктираната стрелка от централизирания критик към actor политиката показва именно актуализацията на политиката. Това означава, че по време на обучение критикът подпомага подобряването на actor модела.

Съществената идея на диаграмата е, че системата използва повече информация по време на обучение, но по-малко информация по време на изпълнение. Това е основното предимство на CTDE подхода. По време на обучението централизираният критик има глобален поглед върху системата и може по-точно да оценява колективното поведение. По време на реално изпълнение всеки робот действа автономно, без необходимост от централен контролер или пълна глобална информация.

В контекста на управление на формации тази архитектура е особено подходяща, защото позволява роботите да се научат да поддържат формация, да избягват сблъсъци и да реагират на промени в средата, като същевременно запазват децентрализирано поведение. Всеки агент взема решение локално, но политиката е обучена така, че индивидуалните действия да водят до координирано колективно движение.

Диаграмата следователно показва връзката между трите основни компонента на CTDE системата: локални наблюдения, споделена actor политика и централизиран critic. Тя подчертава, че централизираното обучение се използва само като помощен механизъм за стабилно обучение, докато крайната система за управление остава децентрализирана и приложима за реални многоагентни роботни системи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статията е предложен разширен концептуален модел и архитектура на система за управление на формации от автономни

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

мобилни роботи чрез дълбоко обучение с подкрепа. Задачата е формализирана като многоагентен процес на вземане на решения с локални наблюдения, споделена политика и централизирано обучение с децентрализирано изпълнение. Представени са три схеми, които описват концептуалния модел, математическата архитектура и CTDE структурата. Дефинирани са функция на награда, safety layer и основни метрики за оценка. Предложената рамка може да служи като основа за реализация на PPO/MAPPO система за обучение на роботни формации в Gymnasium, PettingZoo, ROS или Gazebo. Бъдеща работа включва интегриране на графови невронни мрежи, хибридно MPC--RL управление, формални гаранции за безопасност и експерименти с реални мобилни роботи.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] R. S. Sutton and A. G. Barto, \emph{Reinforcement Learning: An Introduction}, 2nd ed. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2018.

[2] J. Schulman, F. Wolski, P. Dhariwal, A. Radford, and O. Klimov, ``Proximal policy optimization algorithms," arXiv:1707.06347, 2017.

[3] V. Mnih et al., ``Human-level control through deep reinforcement learning," Nature, vol. 518, pp. 529--533, 2015.

[4] R. Lowe, Y. Wu, A. Tamar, J. Harb, P. Abbeel, and I. Mordatch, ``Multi-agent actor-critic for mixed cooperative-competitive environments," in Proc. NeurIPS, 2017, pp. 6379--6390.

[5] C. Yu et al., ``The surprising effectiveness of PPO in cooperative multi-agent games," in Proc. NeurIPS, 2022.

[6] R. Olfati-Saber, J. A. Fax, and R. M. Murray, ``Consensus and cooperation in networked multi-agent systems," \emph{Proceedings of the IEEE}, vol. 95, no. 1, pp. 215--233, 2007.

[7] W. Ren and R. W. Beard, Distributed Consensus in Multi-vehicle Cooperative Control. London, U.K.: Springer, 2008.

[8] M. Mesbahi and M. Egerstedt, Graph Theoretic Methods in Multiagent Networks. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 2010.

[9] O. Khatib, ``Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," The International Journal of Robotics Research, vol. 5, no. 1, pp. 90--98, 1986.

[10] A. D. Ames, S. Coogan, M. Egerstedt, G. Notomista, K. Sreenath, and P. Tabuada, ``Control barrier functions: Theory and applications," in Proc. ECC, 2019, pp. 3420--3431.

[11] A. Raffin, A. Hill, A. Gleave, A. Kanervisto, M. Ernestus, and N. Dormann, ``Stable-Baselines3: Reliable reinforcement learning implementations," Journal of Machine Learning Research, vol. 22, no. 268, pp. 1--8, 2021.

[12]J. K. Terry et al., “PettingZoo: Gym for multi-agent reinforcement learning," in Proc. NeurIPS Datasets and Benchmarks, 2021.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

СИСТЕМА ЗА НАБЛЮДЕНИЕ НА ХАРДУЕРНИ И СОФТУЕРНИ ОТКАЗИ ПРИ АВТОНОМНИ МОБИЛНИ РОБОТИ

A HARDWARE AND SOFTWARE FAULT MONITORING SYSTEM FOR AUTONOMOUS MOBILE ROBOTS

Vanya Markova **Ventseslav Shopov**
Institute of Robotics - Bulgarian Academy of Scinences
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract
This paper presents an extended modular architecture for the diagnosis and monitoring of autonomous mobile robots, based on Raspberry Pi, Linux, and the Robot Operating System (ROS). The proposed system is designed for the collection, publication, analysis, logging, and visualization of diagnostic information from key hardware and software components, including sensors, motor drivers, system resources, communication interfaces, and power supply modules. The architecture employs the ROS diagnostics framework, standard diagnostic messages, system logs, and visualization tools such as rqt_robot_monitor, rqt_graph, and RViz. Diagnostic states are formulated, together with a table of monitored parameters, an algorithm for the operation of a diagnostic node, representative experimental scenarios, and metrics for system evaluation. The proposed approach supports real-time condition monitoring, early anomaly detection, and improved operational reliability of mobile robotic platforms. Future research directions are outlined toward predictive maintenance and machine-learning-based diagnostics.

Keywords: autonomous mobile robots, robot diagnostics, ROS diagnostics, Raspberry Pi, condition monitoring, fault detection, system monitoring, predictive maintenance.

УВОД

Развитието на автономните мобилни роботи и приложението им в индустриална автоматизация, логистика, инспекция, образование и сервизна роботика поставят високи изисквания към надеждността, безопасността и предсказуемостта на роботните системи.

Автономният мобилен робот представлява кибер-физична система, в която сензорите, изпълнителните механизми, комуникационната среда, захранването и изчислителните ресурси работят в тясна взаимовръзка. Отказ или нестабилна работа на един от тези компоненти може да доведе до влошаване на навигацията, загуба на локализация или прекъсване на мисията. Общите принципи за изграждане и управление на мобилни роботни системи са разгледани в [2], [5], [6].

Диагностиката на автономни мобилни роботи включва наблюдение на текущото състояние на хардуерни и софтуерни компоненти, откриване на аномалии, регистриране на събития и визуализация на диагностична информация. В практическите роботни системи тя е важна както за реактивното откриване на повреди, така и за превантивната и предиктивната поддръжка. Обикновено се наблюдават параметри като температура, напрежение, ток, натоварване на процесора, използвана памет,

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

честота на сензорните съобщения и латентност на комуникацията. Теоретичните основи на откриването и диагностиката на откази са представени в [8], [9], а използването на диагностични данни за предиктивна поддръжка е разгледано в [10].

В ROS-базирани системи диагностиката може да бъде реализирана чрез стандартния *diagnostics framework. ROS* осигурява модулна софтуерна инфраструктура за комуникация между възли, обмен на съобщения и повторна използваемост на роботни компоненти [1]. Диагностичната функционалност се реализира чрез пакети и инструменти като *diagnostic_msgs*, *diagnostic_updater, diagnostic_aggregator, rqt_robot monitor, rqt_graph* и RViz [3]. С развитието на ROS 2 се разширяват възможностите за изграждане на по-надеждни, разпределени и мащабируеми роботни системи [7].

Като хардуерна основа за лабораторни и прототипни мобилни роботи често се използват вградени платформи като Raspberry Pi поради тяхната достъпност, ниска консумация, Linux съвместимост и възможност за интеграция със сензори и изпълнителни механизми [4]. При автономните и индустриалните мобилни платформи диагностиката е свързана и с изискванията за безопасност, поради което трябва да се отчитат релевантни стандарти за роботни и безпилотни индустриални системи [11], [12].

Целта на настоящата статия е да предложи разширена ROS-базирана архитектура за диагностика и мониторинг на автономен мобилен робот, реализируема върху Raspberry Pi и Linux. Архитектурата обединява диагностични възли за наблюдение на сензори, моторни драйвери, системни ресурси, комуникационна свързаност и захранване, като използва стандартни ROS диагностични съобщения, системни логове и инструменти за визуализация в реално време.

ОБЩА АРХИТЕКТУРА НА ДИАГНОСТИЧНАТА СИСТЕМА

Диагностиката на роботни системи обединява методи от областите на мониторинга на състоянието, откриването на откази, анализа на логове, визуализацията на данни и поддръжката на кибер-физични системи. При автономните мобилни роботи диагностиката е особено важна поради необходимостта роботът да взема решения в реално време и да функционира надеждно в динамична среда.

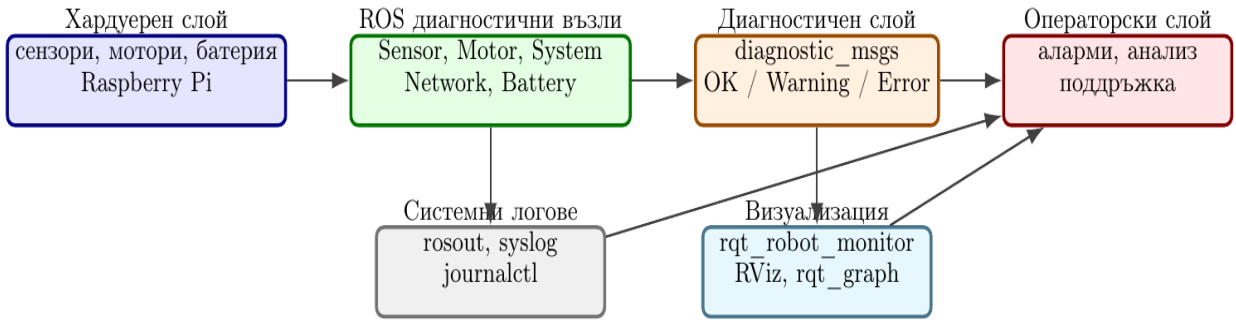
В ROS-базирани роботни платформи стандартният *diagnostics framework* предоставя механизъм за публикуване на информация за състоянието на различни модули чрез съобщения от типа *diagnostic_msgs*. Този подход позволява унифициране на диагностичните данни и тяхното представяне в инструменти като *rqt_robot_monitor*. ROS екосистемата включва и инструменти за визуализация на сензорни данни и комуникационни връзки, като RViz и *rqt_graph,* които са важни при откриване на проблеми в топологията на възлите и при анализ на сензорни потоци.

Предложената система е изградена на модулен принцип. Основната идея е всеки критичен компонент на робота да бъде наблюдаван от отделен диагностичен възел, който периодично измерва или получава съответните параметри, сравнява ги с предварително зададени прагове и публикува обобщено диагностично състояние.

Предложената архитектура включва набор от специализирани диагностични възли. Всеки възел отговаря за определен клас параметри и публикува състояние в общия ROS диагностичен канал.

Системата в настоящия си вид е ориентирана основно към rule-based диагностика и не включва автоматично обучение на модели за прогнозиране на откази.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие



***Фиг. 1**. Архитектура на предложената ROS-базирана диагностична система за автономен мобилен робот*

Архитектурата включва следните основни слоеве:

- хардуерен слой -- Raspberry Pi, сензори, моторни драйвери, батерия и комуникационни интерфейси;
- слой от ROS диагностични възли -- възли за сензори, мотори, системни ресурси, мрежа и захранване;
- диагностичен слой -- стандартни съобщения diagnostic_msgs, агрегиране на състояния и нива на критичност;
- визуализационен слой -- rqt_robot_monitor, Rviz, rqt_graph и потребителски операторски панел;
- логващ слой -- rosout, syslog, journalctl и файлове с исторически данни;
- операторски слой -- аларми, наблюдение, анализ и решения за поддръжка.

Като централен изчислителен модул се използва Raspberry Pi поради неговата достъпност, ниска консумация на енергия, поддръжка на Linux-базирани операционни системи и възможност за изпълнение на ROS. Raspberry Pi осигурява интерфейси за комуникация със сензори, моторни драйвери и мрежови устройства, както и достатъчна изчислителна мощност за базови диагностични и мониторингови задачи.

Сензорният слой може да включва инерциален модул IMU, енкодери, ултразвукови или инфрачервени сензори, LiDAR, RGB или RGB-D камера. От диагностична гледна точка за всеки сензор е важно да се наблюдават честотата на публикуване на данните, валидността на измерванията, латентността и наличието на прекъсвания в сензорния поток.

Изпълнителните механизми включват електродвигатели, моторни драйвери, енкодери и евентуално сервомеханизми. Диагностиката на моторните драйвери трябва да следи напрежение, ток, температура, претоварване и наличие на комуникационни грешки. При мобилни роботи, задвижвани от батерии, от особено значение е и наблюдението на захранващата система. Battery Management System може да предоставя информация за напрежение, ток, температура, ниво на заряд и оценка за оставащо време на работа.

Софтуерният слой включва операционна система Linux, ROS middleware, диагностични възли, инструменти за визуализация и логващи механизми. Linux осигурява достъп до системни параметри като CPU натоварване, температура, използвана

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

оперативна памет, дисково пространство и състояние на системните услуги. ROS осигурява комуникационната инфраструктура между отделните възли чрез topics, services и messages.

Основен компонент е ROS diagnostics framework, който позволява всеки възел да публикува информация за своето състояние. Диагностичните съобщения могат да бъдат агрегирани и визуализирани, което улеснява оператора при откриване на проблеми. Всеки диагностичен възел може да работи с различна честота в зависимост от критичността на наблюдавания компонент. Например мониторингът на батерията и моторните драйвери може да изисква по-висока честота, докато проверката на свободното дисково пространство може да се извършва по-рядко.

наличие на невалидни стойности възелът генерира състояние Warning или Error. Това е особено важно при сензори, които участват в локализацията и избягването на препятствия.

Motor driver monitor node. Възелът наблюдава напрежението, тока, температурата и комуникацията с моторните драйвери. Повишена температура или прекомерна консумация на ток може да бъде индикатор за претоварване, блокиране на колело или механичен проблем. При критично състояние системата трябва да генерира аларма и, при необходимост, да ограничи движението на робота.

System monitor node. Системният монитор наблюдава изчислителните ресурси на Raspberry Pi, включително натоварване на процесора, температура, използване на

Компонент	Параметър	Диагностично условие	Ниво на състояние
IMU / сензорен възел	Честота на съобщенията	Честота под зададен праг или липса на данни	Warning / Error
Моторен драйвер	Температура	Температура над допустимата граница	Warning / Error
Моторен драйвер	Консумиран ток	Открито претоварване или блокиране	Error
Батериен модул	Напрежение	Напрежение под безопасния праг	Warning / Error
Raspberry Pi	Температура на CPU	Температура над зададен праг	Warning / Error
Raspberry Pi	RAM и CPU натоварване	Използване на ресурси над допустима стойност	Warning
Мрежов интерфейс	Загуба на пакети и латентност	Висока латентност или прекъсване на връзката	Warning / Error
ROS възел	Heartbeat / активност	Липсващи диагностични съобщения	Error

***Таблица 1**. Примерни експериментални сценарии за оценка на диагностичната система*

Предложената архитектура включва набор от специализирани диагностични възли. Всеки възел отговаря за определен клас параметри и публикува състояние в общия ROS диагностичен канал.

Sensor monitor node. Този възел следи честотата, коректността и непрекъснатостта на сензорните съобщения. При липса на съобщения, прекалено ниска честота или

оперативна памет и свободно дисково пространство. Тези параметри са важни, защото претоварване на изчислителния модул може да доведе до закъснения в управлението и нарушаване на работата в реално време.

Network monitor node. Мрежовият монитор анализира качеството на комуникацията. Наблюдават се латентност, загуба на пакети, стабилност на Wi-Fi връзката и прекъсване на комуникацията между въз-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

лите. При мобилни роботи, които работят отдалечено или в група, мрежовата диагностика е критично важна.

Battery monitor node. Възелът за наблюдение на батерията следи напрежение, ток, температура и ниво на заряд. При достигане на нисък праг на заряд се генерира предупреждение, а при критично ниско ниво системата може да премине към безопасно поведение, например връщане към базова станция или спиране на мисията.

Algorithm 1 Общ алгоритъм на ROS диагностичен възел

```
Инициализирай ROS възел
Дефинирай диагностични прагове за наблюдаваните параметри
Настрой честота на публикуване на диагностични съобщения
while ROS системата работи do
    Прочети текущите стойности на наблюдаваните параметри
    Провери валидността на измерванията
    if параметрите са в нормалния диапазон then
        Задай състояние OK
    else if има отклонение от нормалния режим then
        Задай състояние Warning
    else
        Задай състояние Error
    end if
    Публикувай съобщение чрез diagnostic_msgs
    if състоянието е Warning или Error then
        Запиши събитието в системния лог
    end if
end while
```

***Фиг 2**. Алгоритъм за работа на диагностичен възел*:

Очаква се предложената диагностична система да осигури надеждно наблюдение на основните компоненти на автономния мобилен робот. При нормална работа диагностичните възли трябва да публикуват състояние OK, а при отклонения от зададените прагове -- Warning или Error. Системата трябва да позволява бърза локализация на проблеми, например липсващ сензорен поток, повишена температура на процесора, ниско напрежение на батерията или прекъсване на мрежова връзка.

Практическата полза от архитектурата е свързана с повишаване на надеждността и поддръжката на мобилната платформа. В лабораторни условия системата може да се използва за обучение, експерименти и проверка на нови алгоритми. В приложни условия тя може да служи като основа за операторски мониторинг, превантивна поддръжка и събиране на исторически данни.

Важен аспект е, че системата е модулна и може да бъде разширявана. Добавянето на нов сензор, нов моторен драйвер или допълнителен софтуерен модул изисква създаване на съответен диагностичен възел, който публикува информация в общия диагностичен канал. Това прави подхода подходящ както за единични роботи, така и за бъдещо разширение към група мобилни роботи.

Предложената диагностична архитектура има няколко ограничения. Първо, Raspberry Pi разполага с ограничени изчислителни ресурси, което може да окаже влияние при едновременно изпълнение на навигационни, визуални и диагностични модули. Второ, надеждността на диагностиката зависи от правилния избор на прагови стойности за отделните параметри. Твърде ниските прагове могат да доведат до фалшиви аларми, а твърде високите -- до пропуснати откази.

Трето, системата в настоящия си вид е ориентирана основно към rule-based диагностика и не включва автоматично обучение на модели за прогнозиране на откази. Четвърто, необходима е експериментална валидация върху реална мобилна платформа при различни режими на работа, включително продължителни тестове, различни натоварвания, нестабилна комуникация и промени в околната среда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Бъдещата работа ще бъде насочена към разширяване на предложената диагностична система с методи за предиктивна поддръжка, базирани на данни. Исторически диагностични логове и времеви редове от сензори, моторни драйвери, батерийни модули и системни ресурси могат да бъдат

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

използвани за обучение на модели за ранно прогнозиране на откази. Възможни подходи са откриване на аномалии, класификация на откази, рекурентни невронни мрежи за анализ на времеви зависимости и системи за подпомагане на решенията при поддръжка.

Друго перспективно направление е разширяване към мониторинг на група автономни мобилни роботи. В такъв случай диагностичната информация от няколко робота може да бъде агрегирана на ниво флот, което позволява анализ на общото състояние на системата, сравнение между отделни платформи и оптимизация на поддръжката.

В статията е предложена модулна архитектура за диагностика и мониторинг на автономни мобилни роботи, базирана на Raspberry Pi, Linux и ROS. Системата обединява диагностични възли за наблюдение на сензори, моторни драйвери, системни ресурси, комуникационна свързаност и захранване. Чрез използването на ROS diagnostics framework, стандартни диагностични съобщения, инструменти за визуализация и системни логове се осигурява възможност за наблюдение на състоянието на робота в реално време и ранно откриване на аномалии.

Предложената архитектура има практическа стойност за лабораторни мобилни платформи, учебни роботни системи и прототипи на автономни мобилни роботи. Основните ѝ предимства са модулност, разширяемост, съвместимост с ROS и възможност за интеграция с операторски интерфейси. Като бъдещо развитие се предвижда включване на методи за машинно обучение и анализ на исторически диагностични данни с цел предиктивна поддръжка и прогнозиране на откази.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] M. Quigley, K. Conley, B. Gerkey, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, R. Wheeler, and A. Ng, ``ROS: an open-source Robot Operating System," in ICRA Workshop on Open Source Software, 2009.

[2] B. Siciliano and O. Khatib, Eds., Springer Handbook of Robotics. Springer, 2016.

[3] ROS Wiki, ``diagnostics," url : {http://wiki.ros.org/diagnostics}.

[4] Raspberry Pi Foundation, ``Raspberry Pi Documentation," 2023. url : {https://www.raspberry.com/documentation}.

[5] S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox, Probabilistic Robotics. MIT Press, 2005.

[6] P. Corke, Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB, 2nd ed. Springer, 2017.

[7] S. Macenski, T. Foote, B. Gerkey, C. Lalancette, and W. Woodall, ``Robot Operating System 2: Design, architecture, and uses in the wild," Science Robotics, vol. 7, no. 66, 2022.

[8] J. Gertler, Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems. Marcel Dekker, 1998.

[9] I. Hwang, S. Kim, Y. Kim, and C. E. Seah, ``A survey of fault detection, isolation, and reconfiguration methods," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 18, no. 3, pp. 636--653, 2010.

[10] J. Lee, F. Wu, W. Zhao, M. Ghaffari, L. Liao, and D. Siegel, ``Prognostics and health management design for rotary machinery systems," Reviews in Mechanical Engineering, vol. 4, no. 1, pp. 1--13, 2014.

[11] ISO 10218, ``Robots and robotic devices -- Safety requirements for industrial robots," International Organization for Standardization.

[12] ISO 3691-4, ``Industrial trucks -- Safety requirements and verification -- Part 4: Driverless industrial trucks and their systems," International Organization for Standardization

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

ВЪЗДЕЙСТВИЕ НА ПОТОКА НА РАБОТНИЯ ГАЗ ВЪРХУ ЗАВИСИМОСТТА НА МОЩНОСТТА НА AL-МИШЕНИ ОТ ПОТОКА НА РЕАКТИВНИЯ ГАЗ ПРИ ОТЛАГАНЕ НА ТВЪРДО ПОКРИТИЕ CRALSIN ЧРЕЗ РАЗБАЛАНСИРАНО МАГНЕТРОННО РАЗПРАШВАНЕ В ЗАТВОРЕНО МАГНИТНО ПОЛЕ

INFLUENCE OF WORKING GAS FLOW ON THE RELATION OF AL-TARGETS POWER AND REACTIVE GAS FLOW IN DEPOSITION OF CRALSIN HARD COATING BY UNBALANCED MAGNETRON SPUTTING IN CLOSED MAGNETIC FIELD

Ekaterina Zlatareva[1,2*], Stefan Kolchev[1,2], Vasilliy Chitanov[1,2], Denis Faik[1], Marin Gyoshev[1], Tetiana Cholakova[1], Roumen Kakanakov[1], Lilyana Kolaklieva[1,2]
[1]Central Laboratory of Applied Physics, Bulgarian Academy of Sciences
[2]Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"
**e-mail ekpepe31@gmail.com*

Abstract
Technological tests for CrAlSiN hard coating deposition process by unbalanced magnetron sputtering were conducted. Argon flow of 20, 25 and 30 sccm was applied to investigate its influence on the relation of Al-target power and reactive gas flow. It was confirmed that the flow of the working gas does not change the mechanism of the ongoing reactions, but only shifts the system to a new equilibrium. At an argon flow of 30 sccm and a setpoint of the OEM system of 70-65 %, the highest values of Al-targets currents of 7.3 A and 8.6 A and total power of 3.40 kW, nitrogen flow of 20.6 sccm, and total pressure of 0.27 Pa were reached. At these conditions the plasma was the most stable and the contribution of nitrogen to the discharge conditions weakened.

Keywords: magnetron sputtering, CrAlSiN hard coating, technological parameters

ВЪВЕДЕНИЕ

Реактивното магнетронно разпрашване позволява отлагане на твърди покрития със сложен химичен състав, включващи атоми на три или повече елемента. Атомите, изграждащи покритията, могат да произхождат както от мишени от различни материали, така и от повече от един реактивен газ. Използването на средночестотни импулсни източници на захранване допълнително разширява обхвата на достъпните материали, като позволява разпрашването както на метали така и на полупроводникови материали.

Взаимодействието между режимите на работа на мишените от различни материали при едновременно разпрашване води до усложняване на технологичните условия в

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

сравнение с процеса на разпрашване на мишени само от един тип материал. Това влияние се проявява чрез промяна на парциалното налягане на реактивния газ в камерата [1]. Основен източник на нестабилност при реактивното магнетронно разпрашване са повърхностните вторични реакции върху мишените, водещи до образуването на нитридни и оксидни съединения, и последващите промени в условията в камерата [2].

Работният инертен газ е определящ фактор за кинетиката на протичащите процеси. Аргонът има йонизационен потенциал, подходящ за създаване и поддържане на стабилен плазмен разряд при типичните условия, характерни за магнетронните системи [3]. Атомната маса на аргона позволява ефективно предаване на импулс към атомите на мишената, съвместим с повечето материали, които представляват интерес от инженерна гледна точка [2]. Параметрите на плазмата определят скоростта на разпрашване на атоми с достатъчна енергия от мишените, транспорта им до подложката, както и микроструктурата и адхезията на растящия слой [2, 4, 5].

Целта на настоящето изследване е да се задълбочи разбирането на процесите, протичащи във вакуумната камера по време на отлагането на твърди покрития CrAlSiN чрез анализ на взаимовръзките между технологичните параметри и техните допустими работни диапазони. Прецизното управление и оптимизиране на параметрите на отлагане е предпоставка за осъществяване на стабилни технологични режими и получаване на предвидими и възпроизводими резултати.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Експериментите са проведени в установка за разбалансирано магнетронно разпрашване UDP-850-4, Teer Coatings. В цилиндричната вакуумна камера са разположени две по две срещуположно четири правоъгълни мишени – Al, Si, Al и Cr. Аксиално, в средата на камерата е монтирана носеща конструкция от планетарен тип (карусел), върху която се поставят подложките. Управлението на четирите мишени и на каруселa се осъществявя посредством средночестотно постояннотоково захранване. Хромната мишена е с фиксиран ток, а останалите (алуминиевите и силициевата) се управляват чрез фиксирано напрежение. Тези параметри се определят според типа на материала, износването и местоположението на мишените в камерата. Подаваното към носещата конструкция захранване също е с фиксирано напрежение – опорно напрежение.

Работният газ (аргон) и реактивният газ (азот) се подават в камерата чрез контролери по масов поток (MFC). Потокът на азота се управлява чрез система за оптично-емисионен мониторинг. Монохроматорът е настроен на избрана спектрална линия на хрома (λ = 425 nm), като по време на всеки технологичен процес се извършва настройване по интензитет на линията спрямо избрания материал и текущите условия във вакуумната камера. Поради особеностите на технологията – изменения в активната повърхност на мишената от износване, вторични реакции и др., тази настройка е критична за осъществяване на прецизен контрол върху технологичните параметри. Контролният параметър на OEM-системата представлява отношение между измерения емисионен интензитет на хрома към референтния, приет за 100 %.

Проведени са аналогични експерименти при стойности на потока на работния газ аргон 20, 25 и 30 sccm. Те съдържат всички необходими етапи на технологичен процес на отлагане на твърдо покритие CrAlSiN, но със съкратено време.

При подаден определен поток Ar в камерата опорното напрежение се повишава с цел йонно почистване на подложките. Следва отлагане на адхезионен слой от

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

хром. След настройване и стабилизация на системата за оптичен мониторинг съобразно конкретните условия в камерата започва градиентно повишаване на потока на азота. Отлага се преходен слой CrN при постоянни параметри. По време на стъпката за изграждане на основния слой най-напред за кратко време се достигат работните параметри на мишените: Al_1 – 210 V, Si – 200 V, Al_2 – 220 V и Cr – 4 A и опорното напрежение от – 80 V. Стъпката е разделена на два етапа, всеки от които се състои от повишаване на потока на азота чрез намаляване на заданието на ОЕМ системата спрямо опеделено като 100 % при настройването ниво (80/70 % и 70/65%) и от изграждане на слой от CrAlSiN при постоянни параметри.

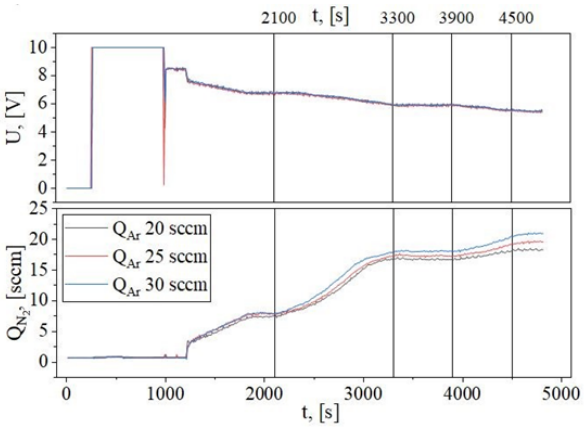
1. Стабилност на потока на постъпващите в системата газове

Подаването на аргона и азота се управлява от контролери по масов поток [6]. Аргонът се подава в камерата по време на целия процес и е необходимо да осигурява стабилно състояние на плазмата. Високото опорно напрежение от -500 V променя условията в плазмения разряд и създава локални флуктуации в температурата и налягането. Чрез обратната връзка към контролера те водят до колебания в неговата работа и в потока на аргона, респективно. Поради това стабилността на потока на аргона е определена за целия експеримент след приключване на стъпката за йонно очистване. Отчетените стойности са обработени и обобщени в Табл. 1. Данните са стационарни и статистическите показатели са добре дефинирани.Системата е много стабилна, особено при по-висок поток. Относителната грешка намалява с увеличаване на потока, което е типично за контролер по масов поток.

Таблица 1 *Стабилност на потока на аргона*

Поток, [sccm]	Стандартно отклонение	Относителна грешка, [%]
20	0.094	0.47
25	0.032	0.13
30	0.024	0.08

Графиката, представена на Фиг. 1, илюстрира изменението във времето на управляващия сигнал на ОЕМ-системата.



Фиг. 1 *Управляващо напрежение и поток на азота*

Съвпадението на кривите U(t) за трите експеримента със зададени еднакви парметри към ОЕМ системата показва много стабилно управление на сигнала. На Фиг. 1 е представено и изменението на потока на азота в хода на времето за трите експериментални режима. Общият вид на кривите изразява процеси, протичащи по сходни механизми, но изместени количествено.

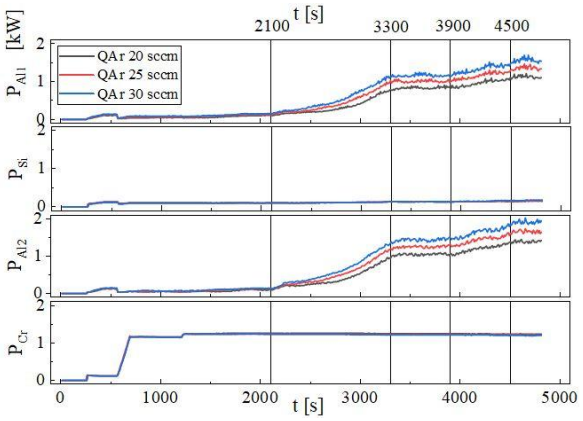
2. Изменение на мощността на мишените в хода на експеримента

По отношение на характеристиките на растящото покритие – кохезия, микроструктура и дебелина, съществено значение имат изменението на мощностите, потока на азота и общото налягане в камерата.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

В началото на основната стъпка напрежението на Al-мишени се повишава до работните стойности, след което се осъществява плавно увеличаване на потока на азота. Този подход ограничава бързото протичане на вторични повърхностни реакции на образуване на алуминиев нитрид върху алуминиевите мишени и осигурява постепенно вграждане на азот в кристалната решетка на нарастващото покритие. Основната стъпка е разделена на две подстъпки, всяка включваща градиентен слой и слой с постоянни параметри. Градиентните слоеве във всеки от експериментите се изпълняват с еднаква скорост на изменение на съотношението на постъпващия хром и азот.

Фиг.2 представя изменението на мощностите на всяка от мишените в хода на експериментите.



***Фиг. 2** Мощност на мишените*

Мишената от Cr се управлява по ток. Избран е режим на подаване на азот, при който върху нейната повърхност се формира незначителен нитриден слой, т.е. тя работи предимно в метален режим на разпрашване. Поради това мощността ѝ остава постоянна (1.2 kW) през основната стъпка. На мишената от Si се подава защитно напрежение от 200 V. По време на експериментите нейната мощността е приблизително 0.1 kW и се изменя незначително. Ясно се наблюдава повишаване на мощността на Al-мишени в етапите на увеличаване на потока на азота.

Аналогичният ход на кривите в изследвания диапазон на основните технологични параметри показва, че потокът на работния газ аргон не променя механизма на протичащите процеси, а единствено измества системата към ново динамично равновесие.

В Табл. 2 са посочени данните за достигнатите стойности на потока на азота, тока и мощността на Al-мишени и общото налягане в камерата в края на градиентните стъпки при трите експеримента.

***Таблица 2** Поток на азота, ток и мощност на Al-мишени и налягане в края на градиентните стъпки*

OEM, [%]	Q_{Ar}, [sccm]	20	25	30
90-80	Q_{N2}, [sccm]	7.0	7.5	7.7
	I_{1max}, [A]	0.5	0.6	0.8
	I_{3max}, [A]	0.5	0.6	0.6
	P_{max}, [kW]	0.19	0.24	0.28
	p, [Pa]	0.17	0.21	0.25
80-70	Q_{N2}, [sccm]	16.9	17.3	18.0
	I_{1max}, [A]	3.7	4.9	5.4
	I_{3max}, [A]	4.4	5.4	6.2
	P_{max}, [kW]	1.76	2.23	2.50
	p, [Pa]	0.2	0.23	0.26
70-65	Q_{N2}, [sccm]	18.3	19.2	20.6
	I_{1max}, [A]	5.3	6.3	7.3
	I_{3max}, [A]	6.3	7.5	8.6
	P_{max}, [kW]	2.50	2.95	3.40
	p, [Pa]	0.2	0.24	0.27

Налягането в камерата, измерено с вакуумметър на Пирани след подаване на зададен поток аргон 20, 25 и 30 sccm е 0.19, 0.21 и 0.24 Pa, съответно.

С промяната на потока на аргона се променя скоростта на разпрашване на материалите [5]. Тъй като потокът на постъпващия в камерата реактивен газ се определя от количеството разпрашен хром, при съ-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

щото зададено съотношение към OEM-системата, в камерата е отчетено постъпване на по-голям поток азот. За поддържане на постоянно напрежение през двата градиентни етапа на основната стъпка, повишаването на потока на азота води до съответно увеличение на техният ток.

В етапите с постоянни параметри при OEM 70 и 65 % системата е в стабилно състояние и не се наблюдават съществени колебания в стойностите.

По време на увеличаване на потока на азота при зададена стойност към OEM системата 70-65 % се достигат най-високи стойности на мощностите на мишените, потока на азота и налягането. При тези условия Al-мишени работят в преходен режим, с частично покрита с нитриди повърхност. Този етап представлява интерес като гранично стабилен режим, включително по отношение на топлинното натоварване и охлаждане на мишените. За него е изследвана взаимовръзката на потока на азота и мощността на алуминиевите мишени чрез линеен регресионен модел. Получените резултати за всеки от експериментите са посочени в Табл. 3.

Таблица 3 *Коефициенти на линейния регресионен модел*

Q_{Ar} [sccm]	R	R^2	SE	β	int
20	0.95	0.91	0.06	0.56	-7.49
25	0.99	0.97	0.04	0.48	-6.02
30	0.99	0.97	0.04	0.42	-4.97

Стойностите на коефициента на корелация $R > 0.95$ показват силна положителна линейна корелация. Коефициентът на детерминация също е висок за всеки от изследваните режими: $R^2 > 90$ %, т.е. потокът на реактивния газ азот е доминиращ фактор за изменението на мощността на алуминиевите мишени. Корелацията е статистически значима: p-стойностите са изключително ниски - $p << 0.001$. Стандартната грешка (SE) е 0.4 – 0.6. С нарастване на потока на аргона наклонът на регресионната права β намалява от 0.56 до 0.42 и свободният член намалява по абсолютна стойност от 7.49 до 4.97. Плазмата става по-стабилна и приносът на азота към условията на разряд отслабва. Чувствителността на процеса към азота става по-малка при повишаване на потока на аргона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведени са тестови технологични експерименти, аналогични на процес на отлагане на твърдо покритие CrAlSiN чрез разбалансирано магнетронно разпрашване при потока на аргона 20, 25 и 30 sccm. При повишаване на потока на аргона стабилността на работата на контролера, управляващ потока на аргона се подобрява. Аналогичният ход на кривите в изследвания диапазон на изменение на потока на азота показва, че потокът на работния газ аргон не променя механизма на протичащите реакции, а измества системата към ново динамично равновесие. При поток на аргона 30 sccm и зададена стойност на OEM системата 70-65 % се достигат най-високи стойности на токовете (7.3 и 8.6 A) и мощността (3.40 kW) на Al-мишени, потока на азота (20.6 sccm) и налягането (0.27 Pa).

При зададени 65% на OEM системата е установена линейна зависимост с висок коефициент на детермнация на мощността на Al-мишени от потока на азота. При поток на аргона 30 sccm плазмата е най-стабилна и приносът на азота към условията на разряд отслабва.

Благодарности

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

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] Berlin E. Ionno-plasmeni protsesi v tonkoplenochnoi tekhnologii. Moskva: Tekhnosphera, 2010.
[2] Gudmundsson J T. Physics and technology of magnetron sputtering discharges. Plasma Sources Science and Technology, 2020; 29(11):13-17, Physics and technology of magnetron sputtering discharges - IOPscience, 2026.
[3] Why Argon Is Used In Magnetron Sputtering? The Ideal Gas For Efficient Thin Film Deposition - Kintek Solution, 2026.
[4] Gibbon P. Introduction to Plasma Physics. In: Proceedings of the 2014 GAS-CERN Accelerator School: Plasma Wake School, vol. 1, 2016, p.1-7, Proceedings of the 2014 CAS-CERN Accelerator School: Plasma Wake Acceleration, 2026.
[5] Klein P. In-situ analysis of metal atom, metal ion and argon ion fluxes in industrial magnetron sputtering with Al, Cr and AlCr targets. Surface and Coatings Technology 2026; 526: p.1-8, In-situ analysis of metal atom, metal ion and argon ion fluxes in industrial magnetron sputtering with Al, Cr and AlCr targets - ScienceDirect, 2026.
[6] GE50A Elastomer-sealed, Digital Mass Flow Controller, 2026.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

INFLUENCE OF HOMOGENIZATION SPEED ON THE MORPHOLOGY AND THERMAL BEHAVIOR OF POROUS CHITOSAN STRUCTURES

Tsveta Sarafska, Stanislava Ivanova, Hristo Petkov, Tony Spassov

Faculty of Chemistry and Pharmacy, Sofia University “St. Kliment Ohridski”
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract

Porous chitosan structures, hereafter referred to as sodium citrate-derived chitosan structures (SDCs), were prepared by co-precipitation using a chitosan solution in dilute acetic acid and sodium citrate as the nonsolvent phase. The process was carried out under high-speed homogenization at different rotational speeds to evaluate their influence on structure formation. The obtained samples were characterized by SEM, DSC/DTA and TGA analyses.

SEM observations showed that increasing the homogenization speed promoted the formation of a more developed and interconnected fibrous network. Thermal analyses indicated differences between native chitosan and the prepared SDC structures, confirming structural modification after co-precipitation. The results demonstrate that homogenization speed is an important parameter affecting the morphology and thermal behavior of chitosan SDC structures.

Keywords: chitosan; sodium citrate; porous structures; homogenization speed; thermal behavior

INTRODUCTION

Chitosan is a natural biopolymer widely studied due to its biocompatibility, biodegradability and ability to form structured polymer networks. The presence of amino and hydroxyl groups allows chitosan to interact with different ionic species, making it suitable for the preparation of porous and fibrous materials.

The properties of chitosan-based structures strongly depend on the preparation conditions, including polymer concentration, nonsolvent phase and mechanical treatment. In this study, chitosan SDC structures were prepared by co-precipitation using sodium citrate as the nonsolvent phase. Special attention was given to the effect of homogenization speed, since the applied shear forces can influence pore formation, fibril development and network organization.

The aim of this work was to evaluate the influence of different homogenization speeds on the morphology and thermal behavior of chitosan SDC structures using SEM, DSC/DTA and TGA analyses.

RESULTS AND DISCUSSION

Porous chitosan structures were prepared by co-precipitation using a chitosan solution and sodium citrate as the nonsolvent phase. The polymer solution was obtained by dissolving 0.15 g of chitosan in 5 mL of deionized water containing 0.0725 mL of acetic acid, corresponding to 3 wt% chitosan in 1.5 wt% acetic acid. The mixture was stirred at room temperature until complete dissolution, while heating was avoided or kept below 40°C when necessary.

The nonsolvent phase was prepared by dissolving 1.29 g of sodium citrate dihydrate in

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

200 mL of deionized water to obtain a 25 mM sodium citrate solution. The chitosan solution was then injected into the sodium citrate solution under high-speed homogenization using a hand homogenizer. The rotational speed of the homogenizer was varied during the preparation in order to evaluate its influence on SDC formation. The polymer solution was injected over 30–60 s, and the resulting SDC suspension was collected and centrifuged at 4 000 rpm for 4 min. After centrifugation, the supernatant was carefully removed, and the SDC pellet was collected. Centrifugation above 4 000 rpm was avoided to prevent fragmentation of the SDCs (Fig.1)

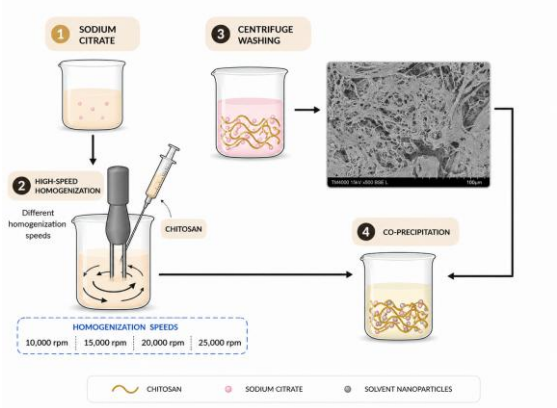


Fig.1. *Schematic representation of the preparation of chitosan SDCs by co-precipitation using sodium citrate as a nonsolvent phase.*

The influence of homogenization speed on the morphology of chitosan SDCs was investigated by scanning electron microscopy. The SEM images revealed that all samples possessed a porous three-dimensional structure, indicating that the co-precipitation process successfully promoted the formation of chitosan-based SDC networks. However, the degree of structural organization, pore development and fibrillar formation strongly depended on the applied homogenization speed.

At 10,000 rpm, the obtained chitosan SDCs exhibited a heterogeneous morphology composed of irregularly distributed pores, entangled fibrillar regions and sheet-like domains (Fig. 2). The presence of compact areas together with less developed fibrillar structures suggests that the applied shear forces were not sufficient to ensure complete dispersion and rearrangement of the polymer phase. As a result, the network appeared less uniform and only partially organized.

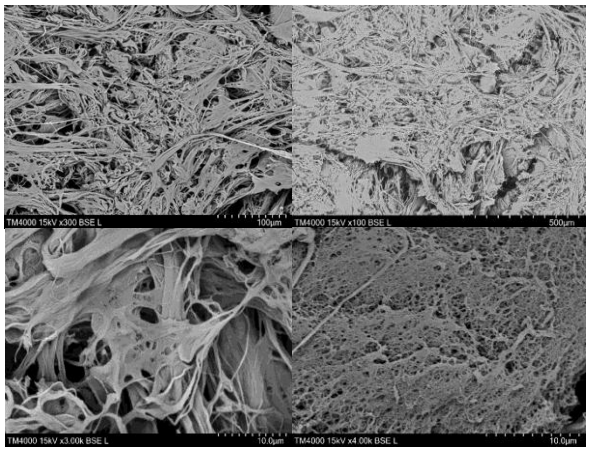


Fig. 2. *SEM micrographs of chitosan SDCs prepared at a homogenization speed of 10,000 rpm.*

When the homogenization speed was increased to 15,000 rpm, a more developed porous structure was observed (Fig. 3). The sample showed better-defined open pores and more clearly expressed fibrillar regions compared with the sample prepared at 10,000 rpm. This indicates that the increase in mechanical energy promoted more effective fragmentation of the polymer phase and enhanced the formation of an interconnected chitosan network. Nevertheless, sheet-like domains were still present, suggesting that the structural organization was improved but not fully optimized.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

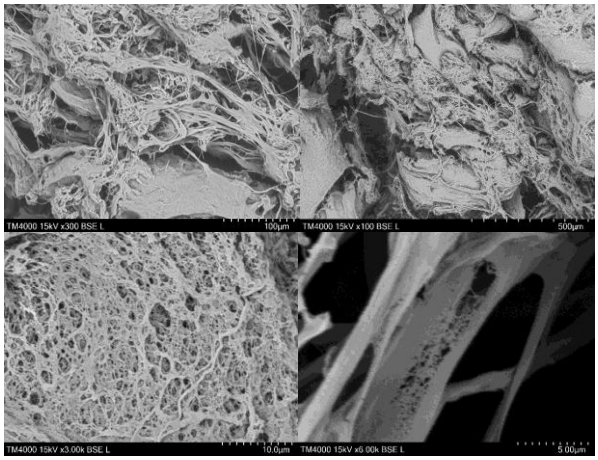


Fig. 3. *SEM micrographs of chitosan SDCs prepared at a homogenization speed of 15,000 rpm.*

A further increase in homogenization speed to 20,000 rpm resulted in the formation of a more homogeneous and highly interconnected porous network (Fig. 4). The morphology was characterized by well-developed pores and continuous chitosan fibrils. Higher-magnification SEM images showed fibrils with thicknesses mainly in the submicron range, approximately 250–900 nm. These observations suggest that 20,000 rpm provides sufficient shear energy to promote the formation of a stable, open and well-organized three-dimensional fibrillar structure.

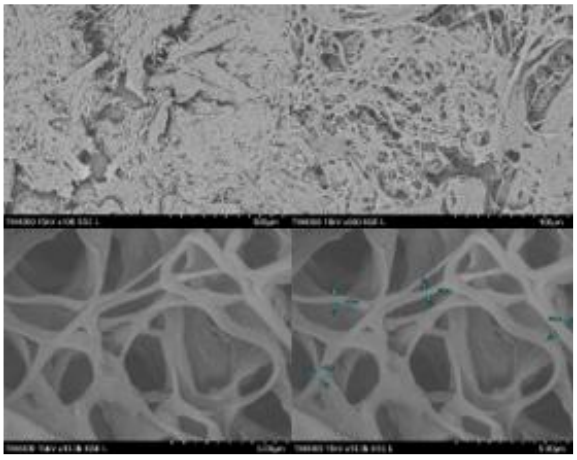


Fig. 4. *SEM micrographs of chitosan SDCs prepared at a homogenization speed of 20,000 rpm.*

At the highest investigated speed, 25,000 rpm, the chitosan SDCs also displayed a porous fibrous morphology; however, the fibrils appeared more irregular, elongated and branched (Fig. 5). The measured fibril thickness was mainly between 500 nm and 1.1 µm. This change in morphology may indicate that excessive homogenization energy does not necessarily lead to further refinement of the network. Instead, it may promote partial aggregation, fibril thickening or restructuring of the already formed chitosan network.

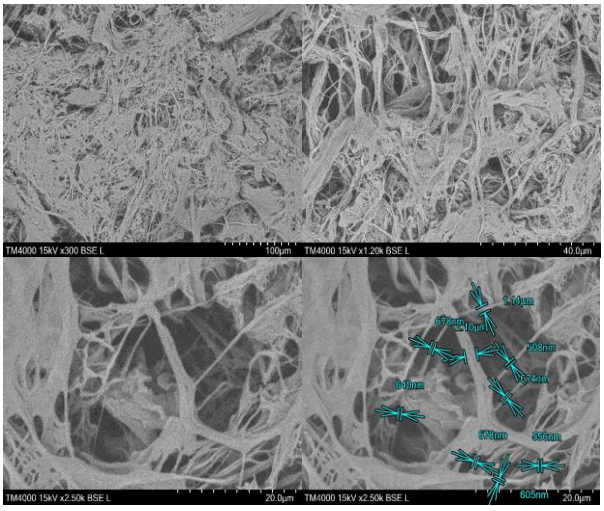


Fig. 5*. SEM images of chitosan SDCs obtained at 25,000 rpm, showing a porous interconnected fibrous morphology.*

Overall, the SEM analysis demonstrates that homogenization speed is a key technological parameter controlling the morphology of chitosan SDCs. Increasing the speed from 10,000 to 20,000 rpm enhanced pore formation, fibrillar development and network homogeneity. Among the studied conditions, 20,000 rpm appeared to be the most favourable for obtaining a uniform, highly interconnected and well-developed porous chitosan SDC structure, while further increase to 25,000 rpm led to a more irregular and partially restructured fibrillar morphology.

The thermal behaviour of native chitosan and porous chitosan structures

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

prepared at different homogenization speeds was evaluated by DTA/DSC analysis (Fig. 6). Native chitosan showed a distinct thermal event in the region around 290–310°C, which can be associated with thermal degradation and structural rearrangement of the polymer chains. The porous chitosan structures exhibited modified thermal profiles compared with native chitosan, indicating that the co-precipitation process and high-speed homogenization affected the organization of the polymer network.

The differences between the thermograms suggest that homogenization speed influences the thermal response of the obtained porous structures. The sample prepared at 25,000 rpm showed the most pronounced change in heat flow, which may be related to its more developed and open porous morphology. These results confirm that the applied processing conditions affect not only the morphology, but also the thermal behavior of the chitosan-based structures.

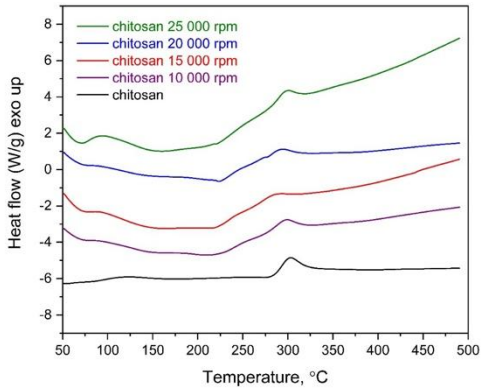


Fig. 6. *DTA thermograms of native chitosan and chitosan SDCs prepared at different homogenization speeds: 10,000, 15,000, 20,000 and 25,000 rpm.*

The thermal stability of native chitosan and chitosan SDCs prepared at different homogenization speeds was evaluated by TGA. As shown in Fig. 7, all samples exhibited a gradual weight loss in the low-temperature region, which can be attributed to the evaporation of physically adsorbed and bound water. The main degradation step occurred between approximately 250 and 330°C, corresponding to the thermal decomposition of the chitosan backbone.

Compared with native chitosan, the SDC samples showed an earlier onset of weight loss, suggesting that the co-precipitation process and the formation of the porous SDC structure affected the thermal stability of chitosan. Among the SDC samples, the curves followed a similar degradation pattern, but slight differences were observed depending on the homogenization speed. The sample prepared at 25,000 rpm showed a somewhat higher weight loss at elevated temperatures, which may be related to its more open and highly developed porous morphology. Overall, the TGA results indicate that homogenization speed influences the thermal degradation behavior of the obtained chitosan SDCs.

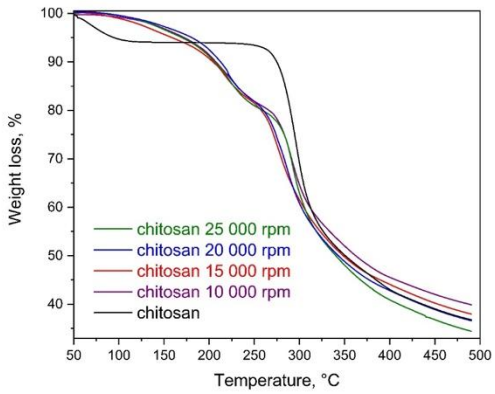


Fig. 7. *TGA curves of native chitosan and chitosan SDCs prepared at different homogenization speeds: 10,000, 15,000, 20,000 and 25,000 rpm.*

CONCLUSION

Chitosan SDC structures were successfully prepared by co-precipitation using sodium citrate as a nonsolvent phase and high-speed

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

homogenization as a structure-forming process. The obtained results demonstrate that homogenization speed plays an important role in controlling the morphology and thermal behavior of the prepared structures.

SEM analysis showed that increasing the homogenization speed from 10,000 to 20,000 rpm promoted the formation of a more developed, homogeneous and interconnected porous network. The sample prepared at 20,000 rpm exhibited the most favorable morphology, characterized by well-defined pores and continuous fibrillar structures. Further increase to 25,000 rpm resulted in a more irregular and branched morphology, suggesting that excessive shear may cause partial restructuring or aggregation of the chitosan network.

Thermal analyses confirmed differences between native chitosan and the prepared SDC structures, indicating structural modification after co-precipitation. Overall, the results show that the morphology and thermal properties of chitosan SDC structures can be effectively controlled by adjusting the homogenization speed during preparation.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was funded by the European Regional Development Fund under the Programme "Research, Innovation and Digitalisation for Smart Transformation" 2021–2027, Project No. BG16RFPR002-1.014-0005, Centre of Competence "Smart Mechatronic, Eco- and Energy-Saving Systems and Technologies".

REFERENCES

[1] Aranaz, I., Alcántara, A. R., Civera, M. C., Arias, C., Elorza, B., Heras Caballero, A., Acosta, N. Chitosan: An Overview of Its Properties and Applications. Polymers, 2021, 13, 3256.

[2] Ke, C. L., Deng, F. S., Chuang, C. Y., Lin, C. H. Antimicrobial Actions and Applications of Chitosan. Polymers, 2021, 13, 904.

[3] Harugade, A., Sherje, A. P., Pethe, A. Chitosan: A review on properties, biological activities and recent progress in biomedical applications. Reactive and Functional Polymers, 2023, 191, 105634.

[4] Torkaman, S., Rahmani, H., Ashori, A., Najafi, S. H. Modification of chitosan using amino acids for wound healing purposes: A review. Carbohydrate Polymers, 2021, 258, 117675.

[5] TA Instruments. Materials Characterization by Thermal Analysis: DSC and TGA. TA Instruments, 2017.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА УСТАНОВКА ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЪЗМОЖНИ ПРИЛОЖЕНИЯ НА ИНФРАЧЕРВЕНИ МАТРИЧНИ СЕНЗОРИ В СИСТЕМИ ЗА ИНТЕЛИГЕНТЕН МОНИТОРИНГ

EXPERIMENTAL SETUP FOR STUDYING POSSIBLE APPLICATIONS OF INFRARED MATRIX SENSORS IN INTELLIGENT MONITORING SYSTEMS

Dimitar Yankov[1], Hristo Radev[2], Galidiya Petrova[3], Grisha Spasov[4], Georgi Bodurov[5]
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"
[1]*Correspondence: d.yankov@tu-plovdiv.bg;* [2]*Correspondence: h_radev@tu-plovdiv.bg;*
[3]*Correspondence: gip@tu-plovdiv.bg;* [4]*Correspondence: gvs@tu-plovdiv.bg;*
[5]*Correspondence: gbodurov@tu-plovdiv.bg*

Abstract
This article presents an experimental setup and practical study of low-resolution infrared matrix sensors designed for applications in intelligent monitoring and human activity recognition systems. The main emphasis is placed on the use of the Melexis EVB90640-41 development platform and the capture of thermal images with IR matrix sensors MLX90640 and MLX90641. The hardware configuration of the system, the installation and setup of drivers and specialized software, the configuration of communication between the sensor and the computer system, as well as the methods for processing and visualization of the measured temperature data are considered. The possibility of non-contact monitoring of the respiratory rhythm in a home environment using IR thermography is studied. A comparative analysis between the two types of sensors is presented in terms of spatial resolution, the quality of the obtained thermal images, the volume of generated data and their applicability in human activity recognition systems. Additionally, results obtained under the same experimental conditions were analyzed, and a comparison was made between the temperature matrices and the visualized thermal images from both sensors.

Keywords: infrared matrix sensors, thermal imaging, human activity, motion detection, Smart Home, thermal monitoring.

ВЪВЕДЕНИЕ

През последните години интелигентните системи за мониторинг се утвърждават като едно от основните направления в развитието на Smart Home и Smart Health Care технологиите. Нарастващият брой възрастни хора и необходимостта от непрекъснато наблюдение на пациенти в домашна среда водят до засилен интерес към разработването на енергийно ефективни и надеждни сензорни системи [1]. Основна цел на тези системи е осигуряването на безопасност и автономност на потребителите чрез наблюдение на човешката активност, физиологичен мониторинг, откриване на рискови ситуации и автоматично известяване при възникване на инциденти.

Традиционните видеосистеми предоставят висока точност и голямо количество информация, но използването им в жилищна среда поражда сериозни проблеми, свързани със защитата на личните данни и неприкосновеността на личното пространство [2]. Поради тази причина през последното десетилетие все по-голямо внимание се обръща на инфрачервените матрични сензори с ниска разделителна способност, които представляват ефективна алтернатива на стандарт-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

ните видеокамери.

Инфрачервените матрични сензори регистрират топлинното излъчване на обектите и генерират температурна карта на наблюдаваната сцена, без да създават детайлно визуално изображение. Това позволява разпознаване на човешките присъствие, движение и активност при запазване на поверителността на наблюдаваните лица. Допълнително предимство на този тип сензори е възможността им за работа при пълна тъмнина, както и ниска консумация на енергия, което ги прави подходящи за интегриране във вградени и IoT системи [3], както и за мониторинг на дишането по време на сън през цялото денонощие.

Домашният респираторен мониторинг е критичен при грижата за възрастни хора, но използването на носими устройства за тази цел е непрактично поради дискомфорт и нужда от регулярно зареждане. Инфрачервената термография предлага безконтактна алтернатива, измерваща дишането чрез температурните промени на въздушния поток под носа на човека, в резултат от охлаждането на въздуха при вдишване и затоплянето при издишване [4, 5].

В редица научни изследвания инфрачервените матрични сензори се използват за изброените приложения [6]. Анализът на публикуваните резултати показва, че чрез използване на подходящи методи за обработка на данните и алгоритми за класификация може да се постигне висока точност при различни сценарии на мониторинг. Особено добри резултати се наблюдават при използване на сензори с по-висока пространствена резолюция, които предоставят по-детайлна температурна информация и позволяват по-добро разграничаване на човешките контури.

Независимо от големия брой публикации в областта, повечето изследвания са фокусирани основно върху алгоритмите за обработка и класификация на данните, докато практическата реализация и настройка на хардуерните платформи остава недостатъчно подробно разгледана. Ограничено внимание се отделя на инсталацията и конфигурирането на специализирания софтуер, настройката на комуникацията между сензора и компютърната система, както и на обработката и визуализацията на измерените температурни данни.

Настоящата статия е насочена към реализацията на система за домашен мониторинг, базирана на развойната платформа Melexis EVB90640-41 и инфрачервените матрични сензори MLX90640 и MLX90641 с ъгъл на зрителното поле от 55°x35°. Представени са: хардуерната конфигурация, инсталирането и настройката на драйвери и специализиран софтуер, обработката на измерените температурни данни. Направен е сравнителен анализ между двата типа сензори при еднакви експериментални условия, за да се анализира и оцени влиянието на резолюцията върху качеството на получените термоизображения за целите на домашния мониторинг.

Детайлно е обърнато внимание на визуализацията и обработката на получените температурни матрици. При проведените експерименти е установено, че използваният специализиран софтуер позволява извличане на данните във формат .CSV, съдържащ температурните стойности на отделните пиксели. За последващ анализ и сравнение между резултатите от двата сензора е използван MATLAB скрипт, чрез който температурните матрици се преобразуват в термични изображения с унифициран мащаб и цветова палитра.

От представените в графичен вид резултати при мониторинг на дишането чрез допълнителен скрипт се извличат данни за дихателния ритъм.

НАСТРОЙКА И РАБОТА С РАЗВОЙНА ПЛАТФОРМА MELEXIS EVB90640-41

MELEXIS EVB90640-41 е развойна платформа, предназначена за работа с инфрачервените матрични сензори модели MLX90640

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

и MLX90641. Платформата позволява директна връзка между IR сензора и персонален компютър без необходимост от разработване на допълнителна хардуерна схема.

Използването на EVB90640-41 значително съкращава времето за изграждане на експериментална система и позволява бързо преминаване към реални тестове и обработка на температурни данни. Това е особено важно при научни изследвания, свързани с разпознаване на човешка активност, тъй като позволява фокусиране върху анализа на данните вместо върху разработката на нов хардуер и комуникационни интерфейси.

Представеният модул осигурява USB комуникация с персонален компютър, I2C интерфейс към IR сензора и стабилизирано захранване на термо-сензора. Чрез специализирания софтуер могат да се настройват параметри като честота на кадрите, режим на работа и визуализация на термична информация. Освен това платформата позволява запис на измерените температурни стойности за последващ анализ и обработка.

В проведените експерименти двата сензора са използвани последователно при идентична конфигурация на системата, което позволява да се оцени влиянието на резолюцията върху качеството на полученото термо- изображение.

При провеждане на експерименталните изследвания съществено значение има правилното позициониране на сензора. Използвани са различни варианти за разположение – таванен монтаж и странично позициониране. Установено е, че монтажът на тавана позволява по-добро проследяване на движение и по-стабилно разпознаване на човешки силуети, докато страничното разположение осигурява по-добра визуализация на отделните движения и промени в позата.

При снемане на дихателна честота сензорите се позиционират фронтално спрямо обекта на дистанция от 0.1м до 0.5м. Тъй като фокусното разстояние и зрителното поле (FoV) на лещите са оптимизирани за приемане на топлинно излъчване, сензорите се настройват така, че лицето на наблюдавания човек да заема централна част на топлинния кадър. Ограничение на приложимостта се наблюдава при липса на пряка видимост към лицето на човек, защото инфрачервеното излъчване не може да преминава през завивка или плътни предмети [7]. Ако човекът закрие изцяло главата си, сигналът се губи, което налага алгоритмите да превключат на изчакване, вместо веднага да генерират сигнал за опасност.

Съществено влияние върху качеството на измерванията оказват и външните топлинни източници. При наличие на отоплителни уреди, директно слънчево осветяване или силни температурни разлики в помещението се наблюдават допълнителни термални смущения, които могат да повлияят върху стабилността на измерванията. Поради тази причина по време на експериментите е осигурена относително стабилна околна температура и минимално влияние на външни топлинни фактори.

За работа с платформата е използван софтуерът Melexis Thermal Camera GUI. След свързване на EVB90640-41 чрез USB операционната система разпознава виртуален COM порт, чрез който се осъществява комуникацията между сензора и компютъра. След избор на съответния COM порт и тип сензор се активира потокът от температурни данни и се визуализира термичното изображение в реално време.

По време на експериментите е установено, че софтуерът позволява надеждна визуализация и запис на температурните измервания, но при експортиране на данните се генерират .CSV файлове, съдържащи единствено температурните стойности на отделните пиксели. Поради тази причина за последваща обработка и сравнение на изображенията от двата сензора е необходимо използването на допълнителен MATLAB скрипт, който преобразува температурните матрици в термични изображения.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Този подход позволява генериране на стандартизирани изображения с еднакъв мащаб и цветова палитра, което е особено важно при директното сравнение на изображенията между MLX90640 и MLX90641. Допълнително, обработката на данните посредством MATLAB позволява анализ на отделни пикселни области, сравнение на температурните стойности и оценка на влиянието на резолюцията върху качеството на изображението.

ХАРДУЕРНА И СОФТУЕРНА НАСТРОЙКА НА EVB90640-41

За провеждане на експерименталните изследвания са използвани: EVB90640-41 развоен модул; сензори тип MLX90640 и MLX90641 със зрително поле от 55°x35°; персонален компютър и специализиран софтуер Melexis Thermal Camera GUI.

След свързване към компютъра, модула се разпознава като виртуален COM порт, чрез който се осъществява комуникацията със специализирания софтуер. Посредством Melexis приложението се извършва настройка на честотата на кадрите и визуализация на термичните изображения в реално време.

При настройката на MLX90640 е използван режим „Chess mode“, който осигурява по-стабилна температурна картина и по-ниско ниво на шум. След проведените изследвания беше установено, че сензорът предоставя значително по-детайлни термични изображения и позволява по-добро разграничаване на човешките контури и движения. При нощен мониторинг на дишането в спални помещения, този сензор осигурява 4 пъти по-висока пространствена плътност, което съответства на средно 115 измервателни пиксела в зоната на интерес (спрямо едва 29 пиксела при по-малкия модел). По-високата пространствена резолюция позволява прилагане на алгоритми за пространствена обработка и потискане на шумовите компоненти чрез анализ на съседни пикселни области, което подобрява стабилността на термичното изображение [8]. Това ефективно неутрализира случайния топлинен шум на околната среда и генерира по-гладка респираторна крива още преди филтрация.

Проведените експерименти със сензор MLX90641 са при същата експериментална конфигурация, но поради по-ниската резолюция се генерират не толкова детайлни термични изображения. От друга страна, MLX90641 генерира по-малък обем данни и позволява по-бърза обработка, което го прави подходящ за вградени системи и приложения с ограничени изчислителни ресурси.

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ МЕЖДУ MLX90640 И MLX90641

За да бъдат сравнени двата сензора са проведени експерименти при еднакви условия на измерване: разстояние до наблюдавания обект, околна температура и честота на кадрите.

На база проведените изследвания е извършено и сравнение на температурните стойности в четири избрани пикселни области от двата сензора, показано в Таблица1.

Таблица 1. Сравнение на температурни стойности при MLX90640 и MLX90641

Пиксел	MLX90640	MLX90641
P1	23.53 °C	25.43 °C
P2	23.77 °C	25.47 °C
P3	23.77 °C	25.63 °C
P4	23.87 °C	26.31 °C

Преди представянето на сравнителните резултати е извършена обработка на температурните матрици. Чрез разработен MATLAB скрипт температурните данни са преобразувани в термични изображения с еднакъв мащаб и цветова палитра, което позволява директно визуално сравнение между двата типа сензори.

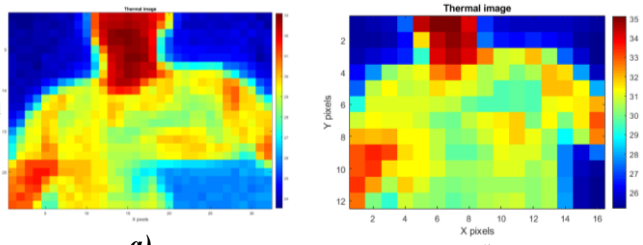
От проведените експерименти е видно, че поради по-високата пространствена резолюзия при MLX90640 човешкият силует е ви-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

зуализиран значително по-детайлно, като се разграничават по-ясно отделните части на тялото и температурните преходи между тях – Фигура 1а. Изображението съдържа повече пространствена информация и позволява по-надеждно проследяване на движения и промени в позата на наблюдавания обект. Аналогично при мониторинг на дихателната честота, по-ясно различими са зоните на носа и устата, където се регистрира промяна в температурата на въздуха при вдишване и издишване, показано на Фигура 2а. Сензорът MLX90640 би бил подходящ за нощен мониторинг за дихателни аномалии поради по-добрата си пространствена устойчивост при движения.

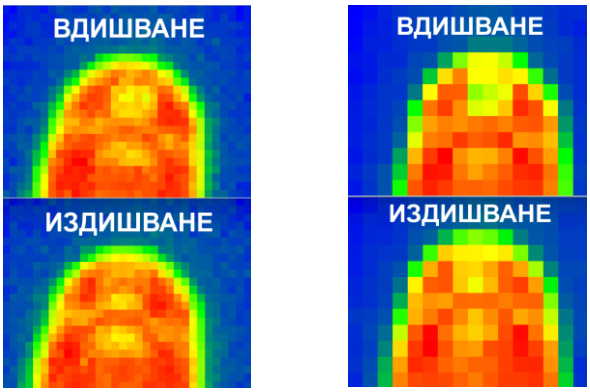
При MLX90641 изображението е по-опростено и с по-ниска детайлност поради по-ниската резолюция – Фигура 1б и 2б. Въпреки това сензорът позволява надеждно откриване на човешко присъствие и основни движения, като генерира значително по-малък обем данни и осигурява по-бърза обработка. От получените резултати, от нашите първоначални изследвания установихме, че MLX90641 е подходящ и за дневен дихателен мониторинг при статична поза. Например, седнало положение при почивка или при гледане на телевизор. Въпреки че необработеното изображение от тази сензорна матрица (16x12) е по-грубо поради ограничения брой пиксели (Фигура 2б), след прилагането на цифрово филтриране успешно се извлича сигнала на дихателната честота. Следователно, MLX90641 е подходящ за интеграция в бюджетни, компактни smart уреди в дневни условия, които да алармират при внезапно влошаване на дишането на наблюдавания човек.

Получените резултати показват, че MLX90640 е по-подходящ за приложения, изискващи по-висока точност и по-детайлна визуализация на човешка активност, докато MLX90641 е по-подходящ за вградени системи и приложения с ограничени изчислителни ресурси, при които основен приоритет



а) *б)*

Фигура 1. *Сравнение на термични изображения, получени от а)MLX90640 и б)MLX90641*



а) *б)*

Фигура 2. *Сравнение на термични изображения, получени от а)MLX90640 и б)MLX90641*

са ниската консумация и бързата обработка на данните.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата статия е представено изследване на инфрачервените матрични сензори от тип MLX90640 и MLX90641 чрез използване на развойната платформа Melexis EVB90640-41. Разгледани са настройката на хардуерната и софтуерната среда, обработката на температурните данни и сравнението между двата типа сензори.

Проведените експерименти показват, че MLX90640 предоставя по-детайлни термични изображения и позволява по-добро разпознаване на човешка активност, докато MLX90641 осигурява по-бърза обработка и по-ниско натоварване при системате с ограничени изчислителни ресурси.

В допълнение е установено, че експортирането на температурните данни във формат .CSV изисква последваща обработка чрез

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

MATLAB скрипт за генериране и сравнение на термичните изображения.

Получените резултати показват, че инфрачервените матрични сензори с ниска разделителна способност представляват едно бюджетно, достъпно и ефективно решение за изграждане на системи за интелигентен мониторинг и разпознаване на човешка активност при запазване на личното пространство на потребителите. Наред с това, те са приложими за безконтактно снемане на сигнал за дихателната честота и респираторна диагностика в системите за Smart Home.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] L. De Silva, C. Morikawa, and I. M. Petra, “State of the art of smart homes,” Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 25, no. 7, pp. 1313–1321, 2012.

[2] J. R. Padilla-López, A. A. Chaaraoui, F. Gu, and F. Flórez-Revuelta, “Visual privacy by context: Proposal and evaluation of a level-based visualisation scheme,” Sensors, vol. 15, no. 6, pp. 12959–12982, 2015.

[3] K. A. Muthukumar, M. Bouazizi, and T. Ohtsuki, “A novel hybrid deep learning model for activity detection using wide-angle low-resolution infrared array sensor,” IEEE Access, vol. 9, pp. 112442–112458, 2021.

[4] Analia, Riska, Anne Forster, Sheng-Quan Xie, and Zhiqiang Zhang. 2026. "Adaptive Thermal Imaging Signal Analysis for Real-Time Non-Invasive Respiratory Rate Monitoring" Sensors 26, no. 1: 278. https://doi.org/10.3390/s26010278

[5] Mozafari, Mohsen, Andrew J. Law, Rafik A. Goubran, and James R. Green. 2024. "Respiratory Rate Estimation from Thermal Video Data Using Spatio-Temporal Deep Learning" Sensors 24, no. 19: 6386. https://doi.org/10.3390/s24196386

[6] M. Bouazizi and T. Ohtsuki, “An infrared array sensor-based method for localizing and counting people for health care and monitoring,” Proc. IEEE EMBC, Montreal, Canada, 2020, pp. 4151–4155.

[7] Alves, Raquel, Fokke van Meulen, Sebastiaan Overeem, Hennie Janssen, Pauline van Hirtum, Svitlana Zinger, and Sander Stuijk. 2025. "Thermal Cameras for Overnight Measuring of Respiration in a Clinical Setting" Sensors 25, no. 19: 5956. https://doi.org/10.3390/s25195956

[8] N. Gu, B. Yang, and T. Zhang, “Dynamic fuzzy background removal for indoor human target perception based on thermopile array sensor,” IEEE Sensors Journal, vol. 20, no. 1, pp. 67–76, 2019.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

СРАВНИТЕЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕФЕКТИВНОСТТА НА СИСТЕМА ЗА ПОДПОМАГАНЕ НА ОТОПЛЕНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО НА БИТОВА ГОРЕЩА ВОДА

COMPARATIVE STUDY OF THE EFFICIENCY OF A SYSTEM FOR HEATING SUPPORT AND DOMESTIC HOT WATER PRODUCTION

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

Abstract

Solar systems for domestic hot water with the possibility of supporting heating have been studied. The systems are identical [1-3] and are located in the towns of Tryavna and Varna, respectively, and consist of a buffer tank with a capacity of 1000 l. with the possibility of electrical additional heating of the water from an electric heater and an electric boiler or heat pump. The results of the simulation of the system's operation, as well as its subsequent operation, show that to increase the solar share for heating energy production, it is necessary to increase the collector area or replace the existing collectors with more efficient ones.

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

ВЪВЕДЕНИЕ

При соларното подпомагане на отоплението освен разхода на топла вода трябва да се отчете и необходимата отоплителна мощност. При оразмеряване на соларната система се цели соларен дял от общата отоплителна потребност между 10 и 40 %, [1], [2], [3], [4], [7].

В сезоните със слабо слънцегреене слънчевите колектори много рядко могат да достигнат това високо температурни нива от (50°-70°)*C*. Ако обаче е инсталирано подово или стенно отопление, соларната инсталация може да постигне ниската температура на подаване и връщане (35/25°*C*). В такива инсталации соларният дял в отоплителната потребност може да бъде в порядъка 20 до 40 %.

Целта на изследването е да се покаже работата на една и съща система, поставена при различни географски региони и да се покаже нейната ефективност.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Изследвани са слънчеви системи за битова гореща вода с възможност за подмогане на отоплението. Системите са идентични [1-3] и се намират съответно в гр. Трявна и гр. Варна и състоят от буферен съд с вместимост 1000л. с възможност за електрическо доподгряване на водата от ел. нагревател и електрически котел или термопомпа. Използвани са четири слънчеви плоски колектора, с обща нетна площ 10м^2. Енергията от колекторите се пренася към буферния съд посредством топлообменен апарат със спирално-валцовани тръби, с мощност 15 kW при температура на пода-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

ващата и връщаща соларна течност съответно 60-40ºC. През летния период, когато не се използва отопление, енергията от слънчевите колектори се събира в буферния съд и посредством друг бързонагряващ топлообменен апарат със спирално – валцовани тръби се подава към системата за БГВ. Топлообменният апарат е с проектна мощност 30 kW при температура на подаващата и връщащата вода съответно 60-40ºC.

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

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

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

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

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

От друга страна е необходим определен дебит за пренасянето на топлина от колектора към бойлера и буфера. Въз основа на практически опит е установен минимален дебит в соларния контур в инсталации до 30 m^2 колекторна площ от порядъка на 40 l/m^2h, [4], [6].

Следователно минималният дебит в системата може да се определи по зависимостта

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

Където A е нетната площ на колекторите, m^2.

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

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

Загубата на налягане на соларния контур $\Delta p_{с.к}$ се състои от загубата на налягане на тръбопроводите $\Delta p_{тр}$ и сумата от загубата на налягане на вградената арматура $\Delta p_{ар}$.

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

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

$$\Delta p_{с.к} = \Delta pL \qquad (4)$$

Загубата на налягане в арматурите е

$$\Delta p_{ар} = 1/3\Delta p_{с.к} \qquad (5)$$

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

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

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

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

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

$V_б$= обем на буфера (l)

$A_{ж}$ = жилищна площ (m^2)

$v_б$ = специфичен обем на буфера за всеки m^2 колекторна повърхност при базова стойност 70 l/m^2

a = специфична жилищна площ за всеки m^2 колекторна площ при базова стойност 15 m^2/m^2. Тогава

$$V_б = A_{ж} v_б, l \quad (6)$$

За оразмеряването на разширителния съд роля играят освен обусловените от температурата промени в обема на соларната течност също и обема на изпаренията в съдържанието на колектора и на съединителните тръби в случай на авария на инсталацията.

Минималният обем на разширителния съд се изчислява, както следва:

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

$V_v = 0.005 V_A$ - този обем трябва да предотврати образуването на подналягане в соларния контур. Тя възлиза на 0.5 % от обема на инсталацията, но най-малко 3 l.

Това означава, че при обеми на инсталацията до 600 литра резервът течност винаги е 3 l;

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

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

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

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

Налягането на инсталацията на пълнене p_a трябва да е толкова голямо, че при никакви работни условия да не може да попадне въздух в инсталацията в следствие на подналягане. В най-високата точка на инсталацията налягането трябва да е поне 1.5 bar. Тъй като мембранният разширителен съд най-често се намира в мазето, към това минимално налягане следва да се прибави статичното налягане на инсталацията. Тя се изчислява от височината на инсталацията и специфичната разлика на налягане от 0.1 bar/m.

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

където H е статичната височина, m;

z -брой на колекторите;

V_k -обем на колекторите, l.

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

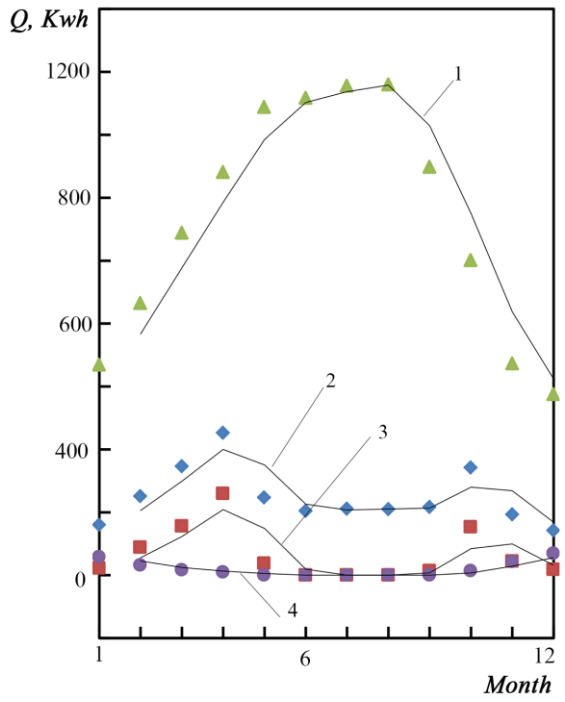
За симулиране на процесите в системата е използван продукта Bosch Solar Simulation [6].

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

Резултатите са представени в графики по-долу.

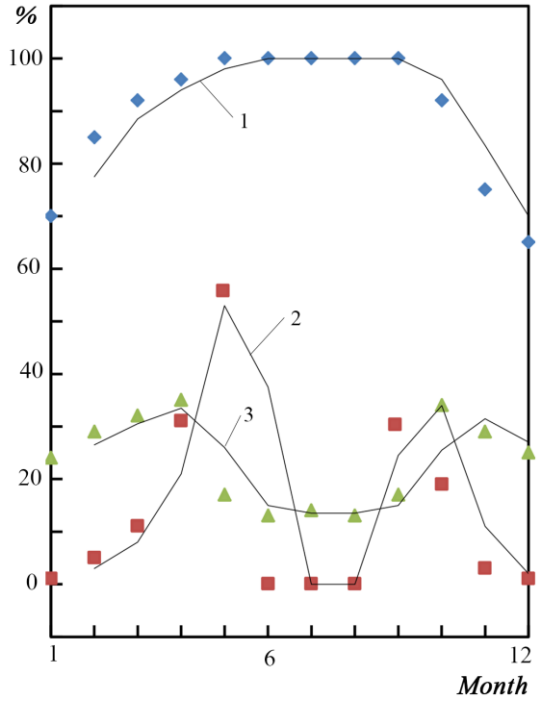
На Фиг.1 е показан средно-месечният добив от слънцегреене в kWh на месец за гр. Трявна, делът на соларно покритие за отопление и БГВ, както и средно-месечният допълнителен дял за доподгряване на системата.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие



Фиг.1. *Средно-месечен соларен добив и слънцегреене за гр. Трявна*

1-Средно-месечно слънцегреене, 2-Средно-месечен соларен добив, 3-Средно-месечен дял за соларно отопление, 4-Средно-месечен допълнителен дял на енергията



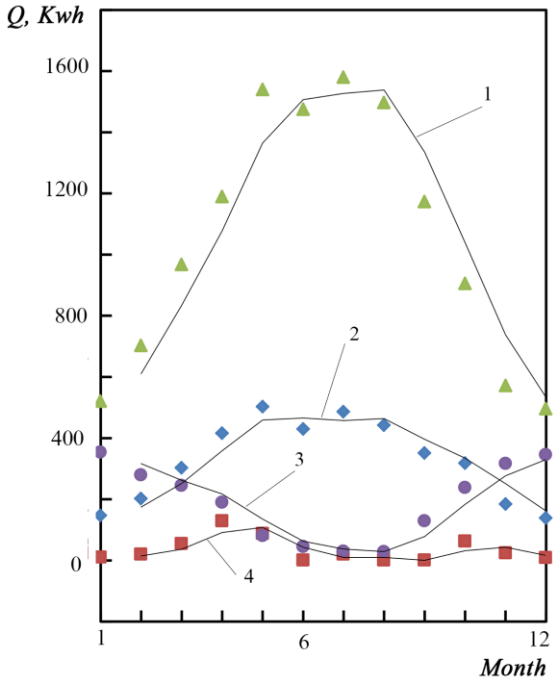
Фиг.2. *Процентен дял соларно покритие, БГВ и ефективност на системата за гр. Трявна*

1-Дял БГВ, 2- Дял соларно покритие за отопление, 3-Ефективност на системата

На Фиг. 2 са представени в процентен дял, отново за гр. Трявна соларното покритие за отопление, БГВ и средно-месечната ефективност на системата.

На Фиг.3 са показани средно-месечният добив от слънцегреене в kWh за гр. Варна, делът на соларно покритие за отопление и БГВ, както и средно-месечният допълнителен дял за доподгряване на системата.

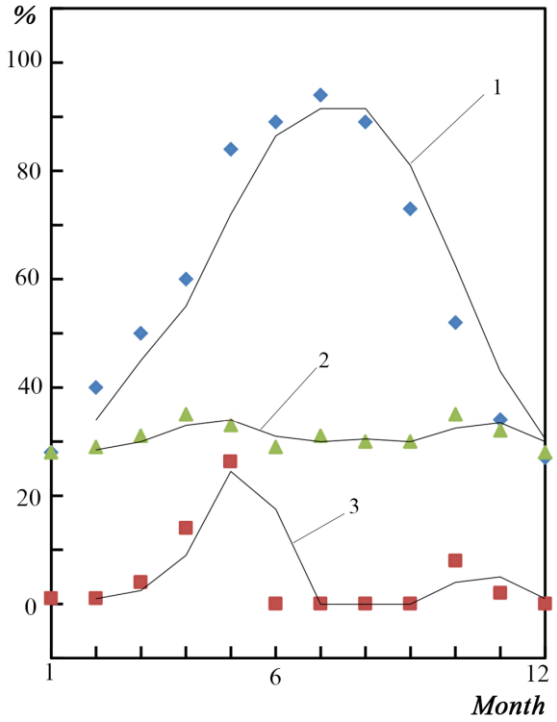
На Фиг. 4 са представени в процентен дял, отново за гр. Варна соларното покритие за отопление, БГВ и средно-месечната ефективност на системата



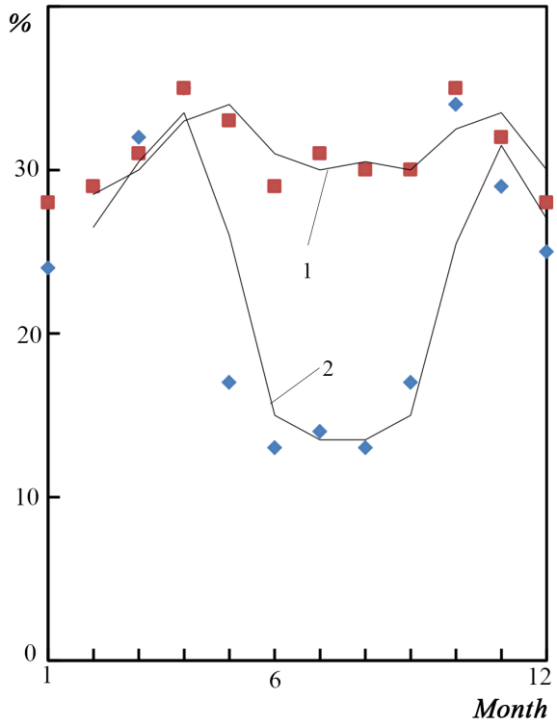
Фиг.3. *Средно-месечен соларен добив за гр. Варна*

1-Средно-месечно слънцегреене, 2-Средно-месечен соларен добив, 3-Средно-месечен дял за соларно отопление, 4-Средно-месечен допълнителен дял на енергията

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие



Фиг.4. *Процентен дял соларно покритие, БГВ и ефективност на системата за гр. Трявна*
1-Дял БГВ, 2- Дял соларно покритие за отопление, 3- Ефективност на системата



Фиг. 5. *Сравненние на ефективностите на системите*
1-За гр. Варна, 2- За гр. Трявна

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От резултатите, получени от симулацията на работата на системата в гр. Варна, ясно се вижда, че общият средно-годишен дял на соларно покритие за отопление на сградата е 4.2%, докато делът за битова гореща вода достига 60.2%. Общият дял на соларното покритие за топла вода и отопление е 24.8%. Макар и сравнително малък, делът за отопление на сградата от слънчевите колектори възлизащ на 413kWh/m2, може да осигури частично подпомагане на системата в месеците март, април, май и октомври.

От резултатите за град Трявна, получени от симулацията на работата на системата, ясно се вижда, че общият средно-го-дишен дял на соларно покритие за отопление на сградата е 16%, докато делът за битова гореща вода достига 90%. Общият дял на соларното покритие за топла вода и отопление е 24%. Макар и сравнително малък, делът за отопление на сградата от слънчевите панели, може да осигури частично подпомагане на системата в месеците март, април, май и октомври.

Резултатите от симулацията на работата на системата, както и последвалата и експлоатация, показват, че за увеличаване на соларния дял за производство на енергия за отопление е необходимо увеличаване на колекторната площ или замяната на съществуващите колектори с по-ефективни.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

ЛИТЕРАТУРА

[1] Пенчев П., Изследване характеристиките на комбинирана система за отопление и битова гореща вода., *Science & Technologies, Volume* VI, *Number* 4: *Technical Studies*, pp 86-93, 2016

[2] Пенчев П., Изследване на характеристиките на комбинирана слънчева система и буферен съд за подгряване на отопление и битова гореща вода – част 1 - теоретична постановка, *Science & Technologies, Volume* X, *Number* 3: *Technical Studies*, pp 28-34, 2020

[3] Пенчев П., Изследване на характеристиките на комбинирана слънчева система и буферен съд за подгряване на отопление и битова гореща вода – част 2 – резултати от изследването, *Science & Technologies*, *Volume* X, 2020, *Number* 3: *Technical Studies*, pp 35-39, 2020

[4] Пенчев П., Моделиране на система на отопление и битова гореща вода, *Proc. International Scientific conference „Mechatronic, eco- and Energy saving systems and Technologies*“, pp 100-105, 2025

[5] Термична соларна техника-документация за планиране, *Robert Bosch GMBH*, 2012

[6] Bosch Solar Simulation V2.1.5*, Robert Bosch GMBH* ,2012

[7] Kalogirou S. A., Solar Energy Engineering, Processes and Systems, Second edition, *Elsevier Inc*., 2014

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

ЕФЕКТИВНОСТ НА СПИРАЛНИ ЛЕНТИ В ТОПЛООБМЕННИ АПАРАТИ ТИП „ТРЪБА В ТРЪБА“

EFFICIENCY OF TWISTED TAPES IN "TUBE-IN-TUBE" HEAT EXCHANGERS

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

Abstract
This study is a critical review of the PEC criterion, Eq. (1), used in the most common studies to evaluate the efficiency obtained from the use of different inserts, especially in single- or two-fluid heat exchangers with single-phase flow. In most cases, the implementation of inserts can be considered as “retrofit” applications in heat exchangers with fixed geometry and a certain mass flow rate. Therefore, a reduction in the mass flow rate is not allowed and the restriction must be maintained.

Keywords: Twisted tapes, PEC, Heat Exchanger.

ВЪВЕДЕНИЕ

Добре известно е, че използването на техники за подобряване на топлообмена намалява генерирането на ентропия и води до спестяване на енергия в топлообменниците.

Критериите за оценка на ефективността (PEC) относно еднофазните потоци могат да бъдат групирани в два класа: методи за сравнение на повърхностните характеристики и методи за сравнение на цялостните повърхностни характеристики. Сравнението на ефективността на повърхността включва сравнение на ефективността на подобрената повърхност с тази на гладката повърхност, когато не се отчитат ефектите на другите флуидни потоци в топлообменника. Към тази група спадат експерименталните изследвания с електрическо нагряване на стената на тръбата.

Бъргълс и др. [1], предлагат девет вида PEC, обозначени като R_1-R_9. Един от тях масово се използва и досега. Този критерий принадлежи към класа „сравнение на производителността на повърхността“ и оценява увеличения топлинен поток, когато основната геометрия и помпената мощност са фиксирани, във формата

$$PEC \equiv R_3 = \frac{Nu_a / Nu_s}{\left(f_a / f_s\right)^{1/3}} \qquad (1)$$

Уеб [2], дефинира PEC като цялостен метод за сравнение на ефективността на повърхността, за да получи предимствата на на подобрените топлопреносни тръбни повърхности предимно в еднофазен поток.

Бежан [3], предлага, стойността на "спестяването на енергия" на всяка техника за подобряване на преноса на топлина

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

да може да бъде оценена чрез способността й да намалява скоростта на генериране на ентропия. Предложеният параметър, описващ ефекта от увеличаването върху необратимостта, е наречен число на генериране на ентропия, дефиниран като N_{sa}

$$N_{sa} = \frac{1}{1+\phi_o}\left(N_T + \phi_o N_p\right) \qquad (2)$$

Където N_T и N_P са стойностите на N_{sa} в границите $\phi_o \to 0$ и $\phi_o \to \infty$.

Съотношението ϕ_o е наречено от Бежан [3], коефициент на разпределение на необратимостта, което е отношението на необратимостта на флуидното триене към необратимостта на температурната разлика в референтния канал.

Ако $N_{sa} < 1$, тогава техниката за интензификаця ще доведе до спестяване на ексергия и очевидно $N_{sa} = 1$ е границата на ползите, които могат да бъдат постигнати. В много приложения на топлообменници стойността на ϕ_o е по-малка от единица. Това означава, че увеличаването на помпената мощност и генерирането на ентропия, поради увеличаването на хидравличното съпротивление, ще има малък ефект върху числото на генериране на ентропия. Поради това фиксираната помпена мощност изглежда като безполезно ограничение и може да бъде премахната от списъка с ограничения.

Зимпаров и др. [4] [5], доказват, че наложеното ограничение за фиксирана помпена мощност в PEC е основна пречка за постигане на по-голяма полза.

Намаляването на скоростта на потока на подобреният топлообменник, за да се отговори на наложеното ограничение за фиксирана помпена мощност, може сериозно да намали ползите от неговата ефективност. В много случаи дебитът на топлообменника е точно фиксиран и ограничението $W_* = 1$ трябва да бъде поддържано. Когато ограничението за фиксирана помпена мощност бъде премахнато, се включва ново ограничение, свързано с числото за генериране на ентропия. Трябва да се отбележи, че изискването $N_{sa} < 1$ е наложено при ограниченията на фиксирани топлинни и масови потоци $Q_* = 1$, $W_* = 1$ и фиксирана геометрия $A_* = 1$. След това критериите на Уеб [2], са значително намалени и тези, които трябва да се прилагат в приложенията за „модернизиране“ са FG-1a и FG-1b.

ИЗЛОЖЕНИЕ

1. Цели

Използването на двта критерия, FG-1a и FG-1b, вместо критерия PEC, ур. (1) се демонстрира, чрез използването на експерименталните резултати на Хеераман и др.[6]. Критерият FG-1a се използва, когато термичните характеристики на повърхността се дефинират чрез експерименти в двутръбен противотоков топлообменник, където общата ефективност на повърхността зависи от ефективността на другата гранична повърхност и нейното термично съпротивление. Критерият FG-1b се използва в, когато топлинните характеристики на повърхността се получават, чрез експерименти с електрическо нагряване на стената на тръбата, където топлинното съпротивление извън стената не съществува.

2. Основни уравнения

Формулирането на PEC изисква отношения, които: (1) определят количествено целевата функция; и (2) определят коефициентите на топлопредаване и хидравличните съпротивления по отношение на референтния топлообменник, като се вземат предвид термичното съпротивление на стената на тръбата, замърсяванята от страната на тръбата и възможността за подобряване

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

едновременно на вътрешната и външната повърхности за двуфлуиден топлообменник. Случаите с критериите за фиксирана геометрия включват замяна едно към едно на гладки тръби с интензифицирани тръби с еднаква дължина и могат да се разглеждат като приложения за „модернизация“. Тази група включва два случая: FG-1a и FG-1b.

Случай FG-1a

Целта на случая FG-1a е да се получи максимално увеличение на топлинната мощност $Q_* > 1$ чрез максимална ефективност $\varepsilon_* > 1$ и максимална обща топлопроводимост $(UA) > 1$. Наложените ограничения са: постоянен дебит на топлообменника $W_* = 1$ и масова скорост $G_* = 1$, $\mathrm{Re}_a = \mathrm{Re}_s$; фиксирана площ, $A_* = 1$ с $D_* = 1$, $N_* = 1$, и $L_* = 1$; фиксирано съотношение на входните температури $\Delta T_i^* = 1$ и $N_{sa} \le 1$. Помпената мощност на топлообменника с „подобрени“ тръби ще се увеличи, $P_* = f_* > 1$. Ако инсталираната помпена мощност не е достатъчна, за да отговори на увеличаването на хидравличните съпротивления, то помпата трябва да се замени с друга. Относителните уравнения за топлинния поток и числото на генерирана ентропия са:

$$Q_* = W_* \varepsilon_* \Delta T_i^* \tag{4}$$

и

$$N_{sa} = \frac{1}{1+\phi_o}\left(\frac{Q_*^2}{Nu_*} + \phi_o f_*\right), \tag{5}$$

следвайки подразбиращите се ограничения и предположението, че когато работният флуид е течност, съотношението $T_{i,s} / T_{o,s} \approx 1$. Тъй като $W_* = 1$ и $\Delta T_i^* = 1$, ур. (4) става

$$Q_* = \varepsilon_* \tag{6}$$

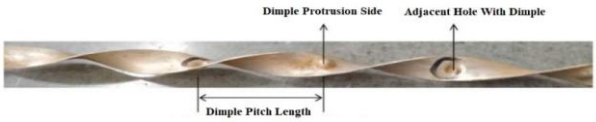
Теоретичното максимално възможно увеличение на топлинния поток, което може да бъде постигнато, е когато коефициентът на генериране на ентропия достигне $N_{sa} = 1$,

$$Q_{*,\max} \cong Nu_*^{1/2} \tag{7}$$

3. Резултати и обсъждане

Случай FG-1a

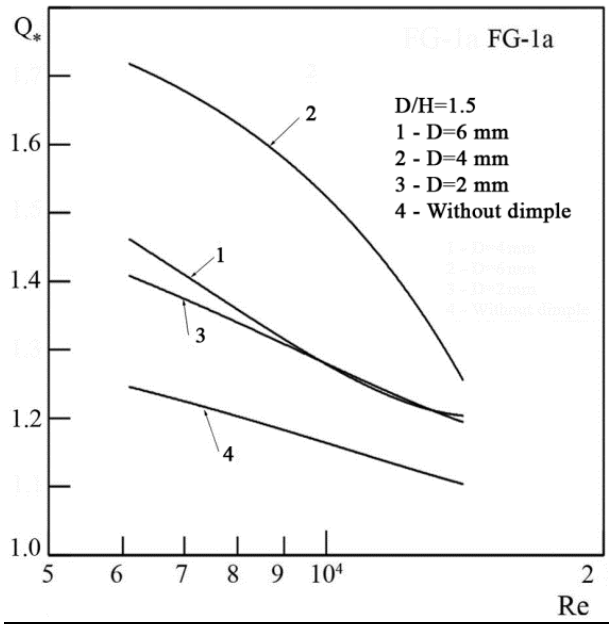
За да се демонстрира как критерият FG-1a се прилага за оценка на ефективността, са използвани експерименталните данни от проучването на Хеераман и др.[6]. Това изследване е свързано с топлинните характеристики на вода, протичаща през двутръбен топлообменник с вложки от усукана лента, имащи различни конфигурации на вдлъбнатини и отвори. Геометричните характеристики на усуканите ленти са съотношение на усукване за всички случаи от 5,5 и съотношение на диаметъра към дълбочината на вдлъбнатината от D/H 1,5, 3,0 и 4,5.



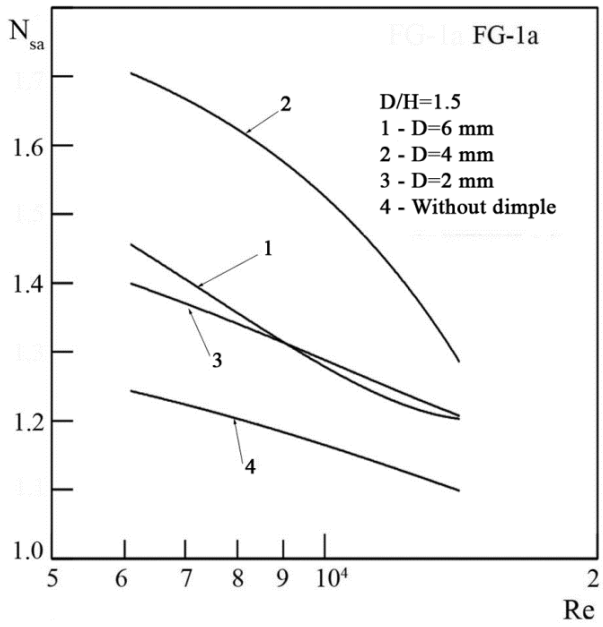
***Фиг. 1**. Геометрични характеристики на спирални ленти, Heeramann et al*

Въз основа на коефициентите на топлопредаване и хидравлично съпротивление, е изчислено изменението на съотношението на топлинния поток с числото на Рейнолдс и е представено на фиг.2а. Трябва да се отбележи, че стойностите на Q_*, представени на фиг.2а, са получени при липсата на външно термично съпротивление. Това означава, че увеличението на Q_* е максимумът, който може да бъде постигнат. Ограничението, $N_{sa} \le 1$, обаче не е изпълнено.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие



Фиг. 2a



Фиг.2b

Фиг. 2. *(a) Изменение на отношението* Q_* *с* Re .

(b) Изменение на числото на генерирана ентропия N_{sa} *с* Re *(данни по Heeraman et al.)*

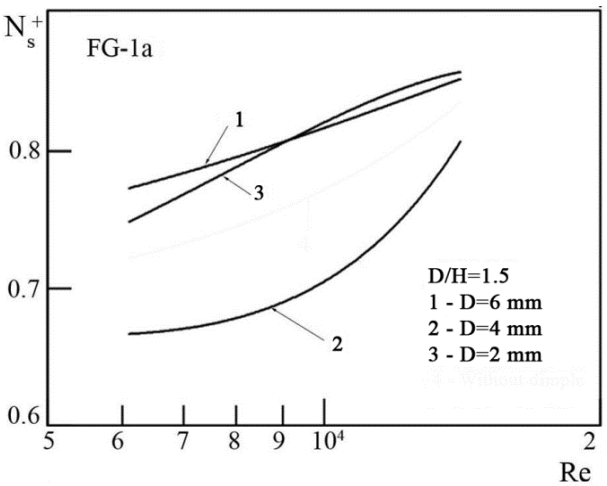
Тъй като няма информация за външното термично съпротивление то е взето от експериментална програма $1/h_o A_o = 0.011\ kW$, и отговаря на диапазона на числото на Рейнолдс от $\mathrm{Re} = (6 \div 14) \times 10^3$.

За да се определи най-добрата конфигурация е необходимо да се използва общ критерий във формата,

$$N_s^+ = \frac{N_{sa}}{Q_*} \qquad (10)$$

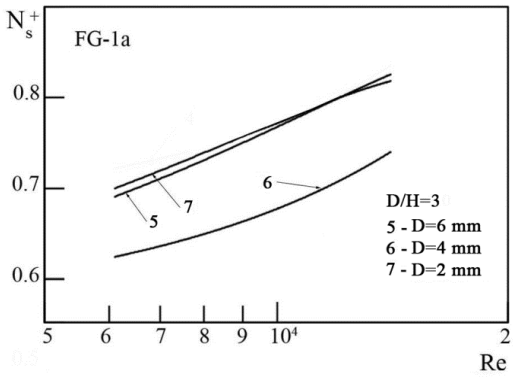
който преследва две цели едновременно: минимално число на генерирана ентропия $N_{sa} \le 1$ и максимален топлинен поток $Q_* > 1$.

Резултатите от използването на този критерий са показани на фиг. 3 за случаите $D/H = 1.5$ и $D/H = 3.0$, докато най-добрите конфигурации 2 и 6 са представени на фиг. 4. Както се вижда, геометричната конфигурация номер 6 е най-добра, което ще доведе до най-голяма стойност $Q_* > 1$, заедно с минимално $N_{sa} < 1$. Трябва да се отбележи обаче, че тази печалба е само 15%, за най-малкото изследвано Re и постепенно намалява с увеличаването му, фиг. 4a.



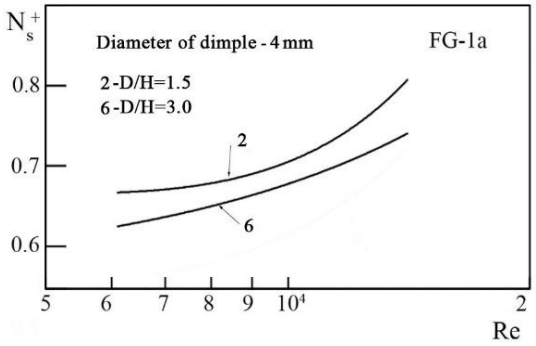
Фиг.3a

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие



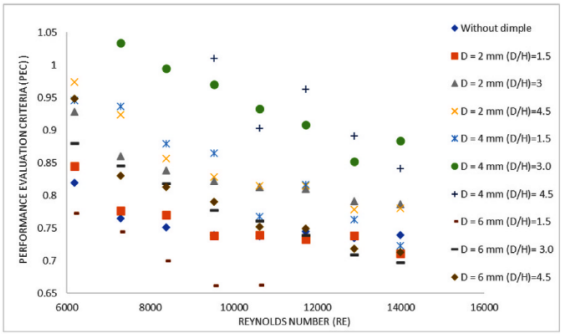
Фиг.3b

Фиг.3. *Изменение на основния критерии* N_s^+ *с* Re *(a)* $D/H = 1.5$. *(b)* $D/H = 3.0$



Фиг. 4. *Изменение на основния критерии* N_s^+ *с* Re *(*$D/H = 1.5$ *и* $D/H = 3.0$*)*

Използването на критерия PEC, ур (1), от Хееграман и др.[6], Фиг. 5 за оценка на ефективността на използваните геометрични конфигурации показва, че всички те са с $PEC < 1$. Това означава, че използването на този критерий PEC, води до погрешни резултати относно оценката на ефективност.



Фиг.5. *Изменение на PEC в зависимост от Re*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Това проучване е критичен преглед на критерия PEC, ур. (1), използван в най-често срещаните изследвания за оценка на ефективността, получена от използването на различни вложки, особено в топлообменници с един или два флуида при еднофазен поток. В повечето случаи внедряването на вложки може да се разглежда като приложения за „модернизиране“ в топлообменници с фиксирана геометрия и определен масов дебит. Следователно намаляването на масовия дебит не е разрешено и ограничението $W_* = 1$ трябва да бъде поддържано.

Критерият FG-1a трябва да се използва, когато топлинните характеристики се определят чрез експерименти в двуфлуиден топлообменник, където общата интензификация зависи от другата гранична стена и нейното термично съпротивление.

Използването на критерия PEC, ур. (1) [7,8] е свързано с много погрешни резултати и неразбрани заключения. Използването на техниките за интензификация на топлообмена с един флуид и с два флуида преследват напълно различни цели: в случая на топлообменник с два флуида целта е повишена мощност $Q_* > 1$, докато в случай на топлообменник с един флуид целта е намаляването на температурата на стената на тръбата и разликата в движещата температурна разлика, чрез намаляване на $\Delta T_i^* < 1$. Ограничението $N_{sa} < 1$ е задължително за спазване и в двата случая.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

[1] Bergles, A. E., et al., Extended Performance Evaluation Criteria for Enhanced Heat Transfer Surfaces, Letters in Heat and Mass Transferer, 1 (1974), Nov.-Dec., pp. 113-120

[2] Webb, R. L., Performance Evaluation Criteria for Use of Enhanced Heat Surfaces in Heat Exchanger Design, International Journal of Heat and Mass Transfer, 24 (1981), 4, pp. 715-726

[3] Bejan, A., Entropy Generation through Heat and Fluid Flow, John Wiley & Sons, New York, USA, 1982, pp. 118-134

[4] Zimparov, V. D., et al., Benefits from the Use of Enhanced Heat Transfer Surfaces in Heat Exchanger Design, Journal of Enhanced Heat Transfer, 23 (2016), 5, pp. 371-393

[5] Zimparov, V. D., et al., Maximum Benefits from the Use of Enhanced Heat Transfer Surfaces, International Communications in Heat and Mass Transfer, 134 (2022), 105992

[6] Heeraman, J., et al., Experimental Evaluation and Thermal Performance Analysis of a Twisted Tape with Dimple Configuration in a Heat Exchanger, Case Studies in Thermal Engineering, 46 (2023), 103003

[7] Zimparov, V. D. Penchev, P. J, Bonev P. J, Heat transfer enhancement with tube inserts how can we define the best benefit?,
Thermal Science: year (2025), vol. 29, no. 1b, pp. 509-520

[8] Penchev, P. J, Heat transfer enhancement with tube inserts how can we define the best benefit?, Monograph, Gabrovo (2024).

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

ПРОВЕРКА НА ТОЧНОСТТА НА ЦИФРОВИ МУЛТИМЕРИ

ACCURACY VERIFICATION OF DIGITAL MULTIMETERS

Nedyu Nedev
Technical university Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract
Measurement accuracy is one of the primary metrological characteristics of digital multimeters. Therefore, during their operational lifetime, periodic verification of their measurement accuracy is required, and calibration should be performed whenever necessary.
This paper presents the results of an accuracy verification study conducted on three digital multimeters used for student training at the Technical University of Gabrovo. The accuracy of the instruments was evaluated in measurements of DC voltage, DC current, electrical resistance, and temperature. A Fluke 725 multifunction process calibrator was employed as the source of reference signals.

Keywords: accuracy, digital mullimeter, process calibrator

ВЪВЕДЕНИЕ

В съвременния свят се налага измерването и контрола на все повече електрически и неелектически величини. За повечето от тях има разработени електроизмервателни уреди и преобразуватели, но използването на няколко уреда едновременно внася неудобство и води до затруднения. Това е наложило разработването на уреди даващи възможност за измерване на повече от една величина, получили наименованието мултимериш[1].

В аналоговата ера с такива уреди най често се измерват ток, напрежение и съпротивление. Развитието на схемотехниката и използването на аналогово-цифрово и цифрово-аналоговото преобразуване води до разработването и бързото разпространение на цифровите мултимери (DMM-digital multimeter). За разлика от аналоговите, цифровите мултимери дават възможност за измерване на по-голям брой величини, като освен изброените по горе може да бъде добавено измерване на капацитет, честота, температура и др.[2]

В процеса на експлоатация и в следствие на различни фактори точността на получаваната измервателна информация от DMM е възможно да намалява, което налага тяхната периодичната проверка, а при нужда и калибриране.

В настоящия доклад се представя проверката на точността на измерване на три цифрови мултимера с помощта на калибратор Fluke 725.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Моделът 725 на фирмата Fluke[3] е преносим мултифункционален процесен калибратор, даващ възможност за измерване на напрежение, ток, съпротивление, честота, налягане и температура с различни по вид термодвойки и RTD (Resistance Temperature Detector). Освен за измерване може да се използва и като източник на симулационни сигнали за тестване и кали-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

бриране на изброените величини. Основните характеристики на калибратора са представени в таблица 1.

Табл.1

Функция измерване/калибриране	Обхват	Точност
Напрежение	0 до 10V (калибриране) 0 до 30V (измерване)	0,2% Rdg + 2LSD
Ток	0 до 24 mA	0,02% Rdg + 2LSD
Съпротивление	15Ω до 3200Ω	0,10Ω до 1Ω
Честота	1 до 1100 Hz 1.0 до 10 kHz	±0,05 % ±0,25 %

Освен представените в таблицата параметри, калибратора има възможност да измерва температура и да симулира работата на термодвойки от типовете J, K,T, E, L, U, B, R и S и RTD от типовете Ni 120, Pt 100-385, Pt 100-3926, Pt 100-3916 и др.

Външният вид на калибратора Fluke 725 е представен на фиг. 1.

Фиг. 1 *Мултифункционален процесен калибратор Fluke 725*

На проверка са подложени три цифрови мултимера от различни производители, използвани в процеса на обучение на студенти в ТУ-Габрово. Целта на проверката е да се повери, дали в следствие на тяхното използване е настъпила промяна на точността на измерване заявена от съответните производители. Уредите подложени на проверка са Metrix M3850D[4], Mastech MAS345[5] и цифров мултимер M890D[6], и са представени на фиг. 2.

Фиг. 2 *Цифрови мултимери Metrix M3850D, M890D и Mastech MAS345*

На проверка са подложени точността на измерване на постоянно напрежение, ток, електрическо съпротивление и температура. Заявените от производителите характеристики са представени в таблица 2.

Табл.2

	Диапазон	Точност
Metrix M3850D		
Постоянен ток	до 40 mA	±0.8 % of rdg + 1 dgt
Постоянно напрежение	0V до 400V	±0.3 % of rdg + 1 dgt
Електрическо съпротивление	до 4 кΩ	±0.5 % of rdg + 1 dgt
Температура	-40°C до200°C	±3 % of rdg + 5 dgt
Mastech MAS345		
Постоянен ток	до 400 mA	±1,2 % of rdg ± 3 dgt
Постоянно напрежение	0V до 400V	±0.5 % of rdg ± 3 dgt
Електрическо съпротивление	до 4кΩ	±1,2 % of rdg ± 3 dgt
Температура	0°C до400°C	±3 % of rdg ± 5 dgt
M890D		
Постоянен ток	до 200 mA	±1,2 % of rdg ± 1 dgt
Постоянно напрежение	0V до 400V	±0.5 % of rdg ± 1 dgt
Електрическо съпротивление	до 20 кΩ	±0.8 % of rdg ± 1 dgt
Температура	-40°C до400°C	±0.75 % of rdg ± 3 dgt

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Табл.3

Напрежение,V / Показание	0.1	0.5	1	3	5	7	10
Metrix M3850D	0,1	0,5	1,002	3,007	4,99	6,99	9,99
Mastech MAS345	0,099	0,498	0,997	2,995	4,98	6,97	9,97
M890D	0,1	0,49	0,99	2,96	4,94	6,92	9,89
	Пресметната грешка, %						
Metrix M3850D	0	0	0,02	0,07	-0,1	-0,1	-0,1
Mastech MAS345	-0,01	-0,02	-0,03	-0,05	-0,2	-0,3	-0,3
M890D	0	-0,1	-0,1	-0,4	-0,61	-0,81	-1,11

За оценка на точността на измерване цифровите мултимери може да се използва приведената грешка, която представлява отношението на абсолютната грешка от измерването към нормиращ коефициент. Абсолютната грешка се явява разликата от показанието на проверявания уред (x) и зададената стойност от калибратора (x_o)

$$\Delta x = x - x_o \,, \qquad (1)$$

а за нормиращ коефициент се приема измервателния диапазон ($x_{max} - x_{min}$), като за приведената грешка може да се запише израза

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta x}{x_{max} - x_{min}} . 100, \quad \%. \qquad (2)$$

Проверка точността на измерване на постоянно напрежение

Проверката е направена в диапазона 0,1V до 10V, отговарящ на диапазона на задавани стойности от калибратора. Показанията на уредите и пресметнатата грешка са представени в таблица 3.

От получените резултати се вижда, че първите два уреда попадат в границите на заявената от производителите точност на измерване на постоянно напрежение и не се нуждаят от калибриране, докато при третия грешката надхвърля значително заявената.

Проверка точността на измерване на постоянен ток

Проверката е направена в диапазона 1mA до 24mA, отговарящ на диапазона на задавани стойности от калибратора. Показанията на уредите и пресметнатата грешка са представени в таблица 4.

Резултатите показват, че при цифровия мултимер M890D е получена грешка надвишаваща заявената от производителя и уреда се нуждае от калибриране и по този показател. Останалите два уреда показват точност отговаряща на предварително заявената.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Табл.4

Ток,mA / Показание	1	5	10	15	20	24
Metrix M3850D	0,997	5,01	10,02	15,03	20,02	24,02
Mastech MAS345	1,008	5	10	15,1	20,1	24,1
M890D	0,998	4,98	9,96	14,94	19,91	24,3
	Пресметната грешка, %					
Metrix M3850D	-0,01	0,04	0,09	0,13	0,09	0,09
Mastech MAS345	0,03	0	0	0,43	0,43	0,42
M890D	-0,01	-0,09	-0,17	-0,26	-0,39	1,3

Проверка точността на измерване на електрическо съпротивление

Проверката е направена в диапазона 15Ω до 3200Ω. Показанията на уредите и пресметнатата грешка са представени в таблица 5.

Табл.5

Съпротивление, Ω / Показание	15	50	100	1000	2000	3200
Metrix M3850D	15,7	50,6	100,5	997	1996	3192
Mastech MAS345	16	51,2	101,7	1012	2024	3239
M890D	16,4	51,4	101,6	1001	2016	3210
Metrix M3850D	0,02	0,04	0,05	-0,09	-0,13	-0,25
Mastech MAS345	0,03	0,04	0,05	0,38	0,75	1,2
M890D	0,04	0,04	0,05	0,03	0,5	0,31

Получените резултати показват, че и трите уреда извършват измерване на електрическо съпротивление със заявената точност и не се нуждаят от калибриране.

Проверка точността на измерване на температура

И трите подложени на проверка уреда поддържат измерване на температура с помощта на термодвойка тип К. Калибратора Fluke 725 може да симулира сигнал отговарящ на промяната на температура в диапазона -200°C до 1370°C, при използване на термодвойка тип К. За проверка на мултимерите избран диапазона 0°C до 200°C. Показанията на уредите и пресметнатата грешка са представени в таблица 6.

Табл.6

Задавана t,°C / Показание	0	25	50	75	100	150	200
Metrix M3850D	3	27	52	77	102	152	201
Mastech MAS345	0	23	48	73	98	147	195
M890D	0	23	48	73	99	148	197
	Пресметната грешка, %						
Metrix M3850D	1,5	1	1	1	1	1	0,5
Mastech MAS345	0	-1	-1	-1	-1	-1,5	-2,5
M890D	0	-1	-1	-1	-0,5	-1	-1,5

Резултатите показват, мултимерите M3850D и MAS345 покриват заявената точност от ±3% в диапазона на изменение на температурата от 0°C до 200°C. При мултимера M890D получената максимална грешка е два пъти по голяма от заявената, което говори за нужда от калибриране на уреда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Извършена е проверка на точността на измерване на цифрови мултимери използвани в процеса на обучение в ТУ-Габрово. На проверка са подложени моделите Metrix M3850D, Mastech MAS345 и цифров мултимер M890D. Проверена е точността на измерване на постоянно напрежение, постоянен ток, съпротивление и температура. Като източник на симулационни сигнали е използван преносим мултифункционален процесен калибратор Fluke 725. От получените резултати е установено, че мултимерът M890D се нуждае от калибриране по отношение точността на измерване на постоянно напрежение, ток и температура. Останалите два уреда точността отговаря на заявената.

БЛАГОДАРНОСТИ

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

рамките на Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност„ "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

[1] L. Finkelstein, Measurement and instrumentation science—An analytical review, Measurement, Volume 14, Issue 1,1994,Pages 3-14,ISSN 0263-2241

[2] H. Weiss, Electrical measurement and instrumentation — Today and tomorrow, Measurement, Volume 12, Issue 2, 1993, Pages 191-210, ISSN 0263-2241

[3] https://media.fluke.com/01877c17-1269-4999-80f8-b10800c25a2d_original%20file.pdf

[4]https://data.kemt.fei.tuke.sk/Meranie_BC/_materialy/Pristroje/Metex_M-3850D-1.pdf

[5]https://www.manualslib.com/manual/1400867/Mastech-Mas345.html

[6]https://tor-online.ro/img/produse/36514/aparat-masura-auto-multimetru-digital-ut890d+-cu-buzer-continuitate-si-afisaj-mare-iluminat_fisa_tehnica.pdf

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

РАЗРАБОТКА НА HMI ИНТЕРФЕЙС ЗА УПРАВЛЕНИЕ И НАСТРОЙКА НА СЕРВОКОНТРОЛЕР SMC3A ЧРЕЗ ESP32 И TFT ДИСПЛЕЙ

DEVELOPMENT OF HMI INTERFACE FOR CONTROL AND SETTING OF SERVOCONTROLLER SMC3A VIA ESP32 AND TFT DISPLAY

Todor Iliev Nedelchev
Technical University of Gabrovo

Prodan Ivanov Prodanov
Technical University of Gabrovo

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

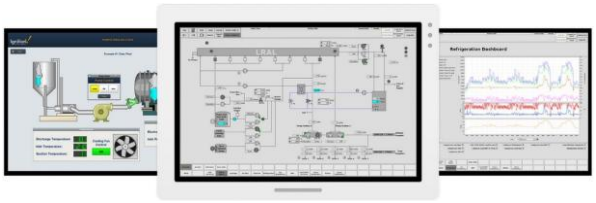
Abstract

This paper presents the design and implementation of a standalone Human-Machine Interface (HMI) module for controlling the SMC3A DC servo controller. The system uses an ESP32 microcontroller, an ILI9341 TFT colour display (240×320 px), an XPT2046 resistive touchscreen and a bidirectional logic-level converter. Communication with the SMC3A is performed via UART at 38 400 baud using an ASCII text protocol. The interface provides three operational screens – parameter editor (P0–P7), motion control (modes M0–M3) and a live terminal – eliminating the need for a PC or HyperTerminal during commissioning. The total hardware cost is below 15 €, making the solution a cost-effective alternative to proprietary industrial HMI panels.

Keywords: *ESP32; SMC3A; servo controller; HMI; UART; TFT touchscreen; PID; motion control*

ВЪВЕДЕНИЕ

В ерата на съвременната индустриализация, интерфейсът човек-машина (HMI - Human-Machine Interface) е потребителски и играе ключова роля в оптимизирането на оперативните процеси и мониторинга на системите за автоматизация. Този вид потребителски графични интерфейси позволява на операторите да взаимодействат, контролират и наблюдават производствените процеси по интуитивен и ефикасен начин, съобразен с конкретния технологичен обект [1]. Този тип представяне на данните и обектите позволява преобразуване на сложните данни от машините в удобна за потребителя информация, като същевременно позволява на операторите да изпращат управляващи команди обратно към машините. В най-общ случай, HMI съдържа полета, графики, схеми които в удобен вид да бъдат разбирани и управлявани от оператора при управление на даден технологичен индустриален процес, като общият вид е показан на фигура1.



***Фиг. 1**. Общ изглед на индустриален HMI*

В индустриални условия, този тип графично преставяне се използват за: визуализация на данни; проследяване на времето за производство, тенденциите и предписанията; контролиране на ключовите пока-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

затели за ефективност; мониторинг на входните и изходните данни на машината, аларми, предупреждения, съобщения и др.

Основно за HMI се използват вградени екрани на машини, компютърни монитори и таблети, като тяхната цел е да дават представа за важните характеристики и параметри на даден процес и тяхното развитие.

HMI технологията се използва в почти всички видове индустрии и технологични процеси за взаимодействие на операторите и технолозите с машините и за оптимизиране на индустриалните процеси. Индустриите в които се използват HMI обхващат: енергетика и енергийно производство; хранително-вкусова промишленост, лека и тежка промишленост; рециклиране; транспорт; водоснабдяване и отпадъчни води, както и много други.

Всеки един потребителски HMI дисплей комуникир с програмируеми логически контролери (PLC Programmable Logic Controllers) и входно/изходни сензори, за да получават и показват информация, която потребителите могат и е необходимо да видят или да въведат. Този тип интерфейси се използват за оптимизиране на индустриални процеси чрез дигитализиране и централизиране на данните за преглед и въвеждане. Чрез използването на HMI операторите е възможно да се представя и предоставя важна информация, показана в графичен или табличен вид, диаграми или цифрови таблици, индикатори, както и да преглеждат и управляват процеси от една конзола.

ИЗЛОЖЕНИЕ

В съответствие с подчертаните по-горе особености, приложение и предимства на човеко-машинния интерфейс, в настоящия доклад се представя разработена система представляваща автономен HMI (Human Machine Interface) модул за управление, настройка и диагностика на серводрайвер за управление на постояннотоков серводвигател. Серводрайвера е разработен и изследван в предходни публикации, като цел та на настоящия доклад е да представи разширяване на неговите функционални възможности, свързани с по-ефективната работа по отношение на настройване на параметри и увеличаване на ефективността на имплементиране при конкретни индустриални условия. Основната идея на разработката е да се замени класическият терминален достъп чрез даден host terminal за който е необходим персонален компютър (например: HyperTerminal/Putty и др.) с графичен индустриален интерфейс, реализиран посредством микроконтролер и графичен дисплей със сензорно управление.

Системата трябва да може да прави локално управление на серводрайвера без необходимост от персонален компютър, което значително улеснява: настройката на PID параметрите; експерименталната работа при настройка в дадена индустриална среда; лабораторни тестове и изследвания; диагностика и мониторинг; настройката на динамичните режими; управление в реално време.

В реализирания серводрайвер има няколко основни режими и параметри които е необходимо да бъдат задавани и настройвани според зададените технологичен процес и работни режими. Те са свързани с избора на режим (таблица 1) и параметрите на ПИД регулатора и ограниченията на основните параметри – скорост, ток и позиция (таблица 2).

Таблица 1

Режим	***Функционалност***
M0	Управление по напрежение
M1	Управление по въртящ момент
M2	Управление по скорост
M3	Управление по позиция

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Таблица 2

Параметър	*Функция*
P0	Ограничение по скорост
P1	Обратна връзка по скорост
P2	Пропорционален коефициент (K_P)
P3	Интегрален коефициент (K_I)
P4	Ограничение на въртящ момент
P5	Коефициент BackEMF на двигателя
P6	Делител на позицията
P7	Диференциален коефициент (K_D)

Една от основните реализирани функционалности е възможността за интерактивна настройка, четене и запис на параметрите (P0–P7) на PID регулатора и сервоконтролера (SMC3A), показани в таблица 2. По този начин се подобрява работата на серводвигателя включващо: оптимизация на динамиката; намаляване на пререгулирането; стабилизиране на системата; настройка на преходните процеси.

В режими M2 (Speed) и M3 (Position) сервоконтролерът SMC3A реализира PID затворен контур. Управляващото въздействие $u(t)$ се изчислява по класическата формула [2]:

$$(t) = \begin{matrix} K_p e(t) + K_I . \int e(t)dt + \\ +K_D \frac{de(t)}{dt} \end{matrix} \quad (1)$$

където $e(t) = r(t) - y(t)$ е грешката между желаната стойност $r(t)$(setpoint) и измерената обратна връзка $y(t)$. В дискретна реализация на ESP32 интегралът се апроксимира натрупващо ($\int = e[k].T$), а производната – чрез разлика (derivative = $(e[k] - e[k-1]/T$).

Основните команди които се използват в серводрайвера за заложени в етапа на неговото проектиране и са част от основния основен програмен код. С тях могат да се правят всички настройки, избор на режим, както и четене и запис на параметри. Техния вид и предназначение е показан в таблица 3.

Таблица 3

Команда	Формат	Параметър	Описание
Help	%?	-	Извежда списък с наличните команди
Servo Mode	%m<mod>	0; 1; 2; 3	Избор на режим на работа
Echo Mode	%e<mod>	0; 1	Включване/изключване на echo режим
Set Command	%s<val>	числова стойност (-255 до +255)	Подаване на команда към сервото
Step Positive	%+<step>	брой стъпки (0 – 19999)	Положително преместване
Step Negative	%-<step>	брой стъпки (0 – 19999)	Отрицателно преместване
Read Parameter	%p<n>	0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7	Прочитане на параметър
Write Parameter	%p<n> <val>	Числова стойност, умножена по 256	Запис на параметър
Save Parameters	%w<bank>	номер банка 0; 1; 2; 3	Запис в EEPROM
Load Parameters	%r<bank>	номер банка 0; 1; 2; 3	Зареждане от EEPROM

За по-лесното оперативно обслужване е установено, че осемте параметъра (P0 – P7) е необходимо за се четат от сервоконтролерът SMC3A при стартиране, да се редактират директно от touch екрана с бутони +/– и се записват обратно в EEPROM на контролера чрез команда wx.

Реализирано е следните видове управление на движението: jog управление; стъпково позициониране; задаване на скорост; управление на въртящ момент; задаване на командни стойности.

В позиционен режим системата позволява прецизно управление на положението чрез стъпкови команди. При параметризиране на сервоконтролера системата реализира четене, визуализация, промяна и запис в EEPROM на параметрите (P0 – P7). Това позволява изграждането на напълно автономна система за настройка без използване на компютър.

При диагностика и мониторинг са реализирани: визуализация на текущия режим; UART (Universal Asynchronous

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

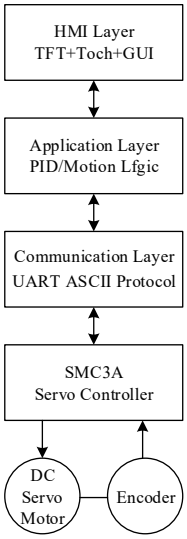
Receiver-Transmitte) мониторинг; индикация за комуникация; извеждане на параметри в реално време. Тези функции позволяват: диагностика на комуникацията; проверка на настройките; анализ на работата на сервозадвижването.

Системата е разработена посредством хардуерната конфигурация [3, 4, 5 и 6] използваща модулите представени в таблица 4.

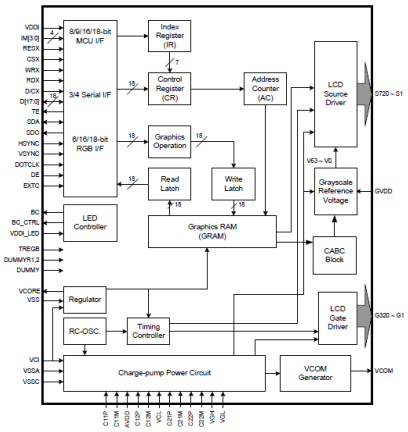
Таблица 4

Компонент	Описание
ESP32	Основен микроконтролер
ILI9341 TFT	Цветен TFT дисплей
XPT2046	Touch контролер
FT232	USB-UART интерфейс
SMC3A	Серводрайвер
Logic Level Converter	Двупосочен преобразувател 3.3V ↔ 5V

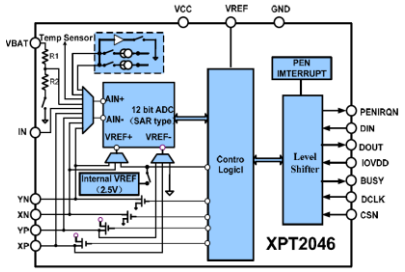
Архитектурата на системата е изградена по модулна layered архитектура показана на фигура 2. HMI Layer отговаря за: визуализацията; touch управлението; екраните; графичните елементи; операторския интерфейс. За реализирането му са използвани: ILI9341 TFT [2]; XPT2046 touch controller[3]. Функционалните им блокови схеми са показани на фигури 3 и 4.



***Фиг. 2**. Архитектура на системата*



***Фиг. 3**. ILI9341 функционална блокова схема*



***Фиг. 4**. XPT2046 функционална блокова схема*

Използваните библиотеки за управление са на TFT дисплея - TFT_eSPI и за управление на touch панела - XPT2046_Touchscreen.

Application Layer реализира: логиката на управлението; обработка на команди; PID настройка; motion control; обработка на потребителските действия.

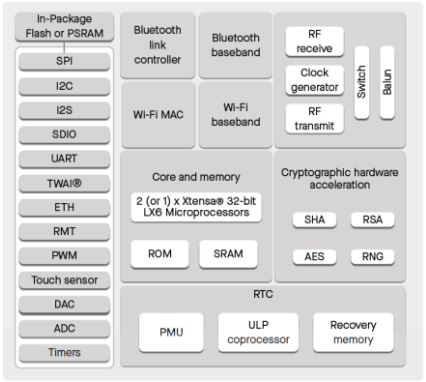
Communication Layer реализира: UART комуникация; ASCII parser; обработка на командите; синхронизация със SMC3A.

Изборът на ESP32 е извършен поради следните причини: висока производителност; dual-core архитектура; голям RAM ресурс; вграден WiFi/Bluetooth; достатъчен брой периферии; SPI и UART интерфейси; ниска цена. Функционалната му блокова схема е показана на фигура 5 [4].

Чрез ESP32 могат да бъдат реализирани и допълнителни възможности: графики; телеметрия; автоматична настройка; запис на данни; trajectory generation; protection algorithms. ESP32 позволява бъдещо доба-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

вяне на индустриални интерфейси: WiFi; Bluetooth; Modbus; MQTT; Ethernet.



***Фиг. 5**. ESP32 функционална блокова схема*

Изградена е следната програмна архитектура.

Фърмуерът е написан на C++ за ESP32 framework и следва четирислойна архитектура. Hardware Layer обхваща ESP32 UART2 (38 400 baud, GPIO16/17) и SPI шина, споделена от ILI9341 и XPT2046 с отделни CS пинове. Communication Layer капсулира функциите smcSend(), smcReadParam() и parseResponse() с двупосочен парсер (формат „P2=768“ и формат „768:“). Application Layer реализира логиката smcSetMode(), smcSetSpeed(), smcStepForward/Backward(), smcReadAll() и smcSendAll(). HMI Layer управлява отрисуването (drawScreenParams/Control/Terminal()) и обработката на touch (handleTouchParams/Control/Terminal()).
Ключов аспект е SPI конфликтната безопасност: ILI9341 (TFT_eSPI) и XPT2046_Touchscreen работят на отделни VSPI инстанции с различни Chip Select пинове (GPIO21 за touch, аппаратен CS за TFT).

Извадка от кода за изпращане на команда и анализиране на отговора:

```
void smcSend(String cmd) {
  smcSerial.print(cmd);
  smcSerial.print('\r');  // SMC изисква CR терминатор
  terminalLog += "> " + cmd + "\n";
}
// Анализатор – поддържа формати "800:" и "P2=768"
if (line.endsWith(":")) {
  params[lastRequestedParam].value = line.toInt();
} else if (line.startsWith("P" + String(i) + "=")) {
  params[i].value = line.substring(key.length()).toInt();
}
```

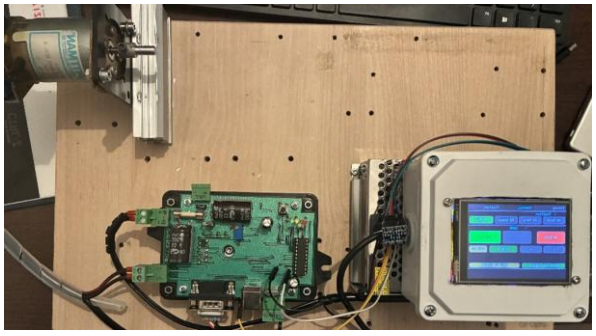
Предимства на изградената архитектура

1. Модулност - всеки слой може да бъде променян независимо: GUI, комуникация, алгоритми;

2. Разширяемост - архитектурата позволява добавяне на нови режими, нови екрани, нови интерфейси, нови алгоритми.

3. Индустриална приложимост - разработката може да бъде използвана като сервизен интерфейс, лабораторен контролер, учебна постановка, експериментална система, индустриален HMI модул.

Практическата разработка на представения HMI интерфейс заедно със серводрайвера има вида показан на фиг. 6.



***Фиг. 6**. Основен вид на разработения HMI модул, управляващ работата на серводрайвер SMC*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Серийната комуникация се осъществява по протокол тип ASCII UART, 38400 baud, 8N1, без flow control. Командите се изпращат с CR (\r, 0x0D) в края на реда. При стартиране устройството автоматично изпраща "e0" за активиране на комуникацията, след което прочита всички параметри P0..P7 от контролера.

Основното меню е „Params“ – фиг. 7. В него се извършва преглед и настройка на параметрите на серво контролера. Показва всички 8 параметъра (P0–P7) в таблица. При избран ред се дава възможност за задаване на стойност в поле, като след това избраният параметър може да се промени с бутоните + и −, след което да се изпрати към контролера с SEND.

***Фиг.** 7. Панел за въвеждане на сервопараметри*

Параметрите които могат да се задават са в следната логическа последователност и диапазон – таблица 5.

Таблица 5

Параметър и наименование	Ст. стойност	Стъпка	Обхват	Единица
P0 – Vel Limit	1024	50	0 – 4096	rev/min
P1 – Vel Gain	1560	50	0 – 4096	K_F
P2 – Prop Gain	768	50	0 – 4096	K_P
P3 – Integr Gain	128	50	0 – 4096	K_I
P4 – Torque Lim	180	10	0 – 255	[A] lim
P5 – Back EMF Gain	1024	50	0 – 4096	K_{back_EMF}
P6 – Encoder devider	800	50	0 – 4096	pulse/rev pulse/mm
P7 – Diff Gain	51	1	0 – 255	K_D

Промените в стойностите са само локални (в паметта на ESP32) докато не се изпратят с SEND. При рестарт параметрите се четат автоматично от контролера.

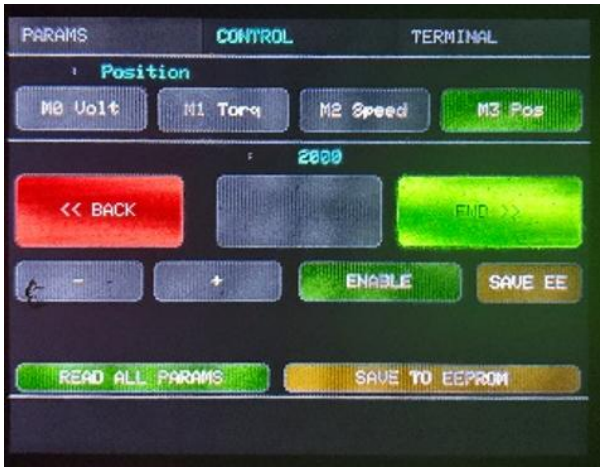
Действието на бутоните на показания на фиг. 7 екран за въвеждане на параметри е обобщено в таблица 6.

Таблица 6

UP	Мести избора нагоре към предишния параметър.
DOWN	Мести избора надолу към следващия параметър.
+ (зелен)	Увеличава стойността на избрания параметър с неговата стъпка.
− (червен)	Намалява стойността на избрания параметър с неговата стъпка.
SEND	Изпраща текущата стойност на избрания параметър към контролера. Команда: Px <value>
READ	Чете стойността на избрания параметър от контролера. Команда: Px
SAVE EEPROM	Записва параметрите в EEPROM на контролера. Команда: w0

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Меню Control – фиг. 8 – използва се за управление на двигателя в реално време. Съдържа четири бутона за избор на режим (M0–M3) и различни контроли в зависимост от избрания режим. Активният режим е маркиран със синьо подчертаване.



***Фиг. 8**. Панел за избор на режим*

Задаването на различните режими M0, M1, M2 или M3 се избира посредством съответния бутон. При режими M0 – M2 се показва хоризонтален speed bar (диапазон −255 до +255) и бутони за управление на скоростта. Стойността се показва вдясно от плъзгача. В режим на позициониране (M3) се визуализират бутони за стъпково позициониране. Стъпката (posStep) се показва над бутоните и може да се регулира от 1 до 1000 с бутоните step− и step+.

***Фиг. 9**. Режим M2 – Управление по скорост*

Действието на основните бутони за показания на фиг. 8 екран е показано в таблица 7. Тези команди са валидни за режими M0 – M2.

Таблица 7

s+	Увеличава скоростта с текущата стъпка. Команда: s<value>
s−	Намалява скоростта с текущата стъпка. Команда: s<value>
+step	Увеличава стъпката на скоростта (максимум 50).
−step	Намалява стъпката на скоростта (минимум 1).
STOP	Спира двигателя незабавно. Команда: s0
ENABLE e0	Активира комуникацията с контролера. Команда: e0
SEND ALL P	Изпраща всички параметри P0–P7 към контролера последователно.
READ ALL	Чете всички параметри P0–P7 от контролера.
SAVE EEPROM	Записва параметрите в EEPROM. Команда: w0

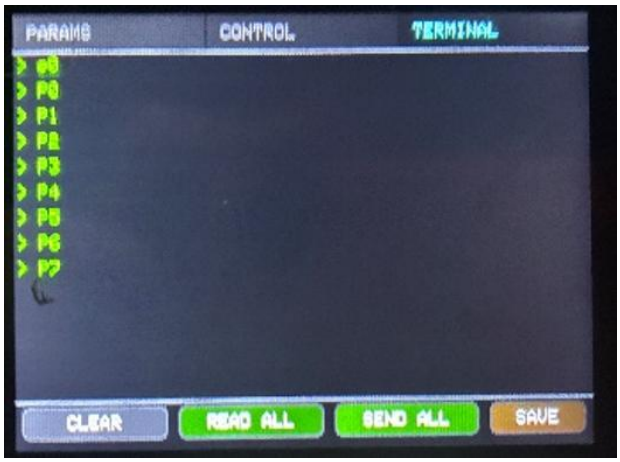
В режим на позициониране действието се променя предвид спецификата на режима и придобиват вида показан в таблица 8.

Таблица 8

<< BACK	Движение назад с текущата стъпка. Команда: −<step>
STOP	Спира двигателя. Команда: s0
FWD >>	Движение напред с текущата стъпка. Команда: +<step>
step −	Намалява стъпката за позициониране с 10 (минимум 1).
step +	Увеличава стъпката за позициониране с 10 (максимум 1000).
ENABLE	Активира комуникацията. Команда: e0
SAVE EE	Записва в EEPROM. Команда: w0
READ ALL	Чете всички параметри P0–P7 от контролера.
SAVE EEPROM	Записва параметрите в EEPROM. Команда: w0

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Меню Terminal – фиг. 10 - показва лог на всички изпратени и получени съобщения в реално време.



***Фиг. 10**. Панел за проследяване на комуникацията*

Полезно за диагностика и проверка на комуникацията с контролера. Редовете са оцветени: изпратените команди са в зелено (>), получените отговори от SMC са в жълто (<). Буферът съхранява последните ~1000 символа; на дисплея се показват последните 13 реда.

Всички команди се изпращат като ASCII текст с CR (0x0D) в края. Контролерът отговаря с числова стойност последвана от ":" (напр. 800:). При активиране (e0) контролерът е готов за приемане на команди.

Извършените експериментални изследвания и модификации на програмния код на разработения човеко-машинен интерфейс (HMI) за управление и настройка на серводрайвер потвърждават коректната работа на създадения модул при всички поддържани режими на управление. Реализираният интерфейс осигурява надеждна двупосочна комуникация, визуализация и настройка на параметрите в реално време, като същевременно елиминира необходимостта от използване на персонален компютър при първоначалното конфигуриране и експлоатация на системата. Модулната структура и екранната организация на разработката позволяват лесно разширяване на функционалността чрез добавяне на нови екрани, диагностични функции, графична визуализация на процесни величини и автоматизирани алгоритми за настройка на регулаторите.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработеното решение осигурява пълна функционална замяна на традиционния терминален достъп чрез HyperTerminal или аналогични програмни средства, като предоставя удобен графичен интерфейс за избор на режим на работа, настройка на параметри, управление на движението и диагностика на комуникацията. Реализираният интерфейс съществено улеснява процесите по настройка, експлоатация и сервизно обслужване на задвижванията, като същевременно намалява необходимостта от използване на външни компютърни системи и специализиран софтуер.

Като бъдещо развитие се предвижда разширяване на системата с функции за автоматизирана настройка на PID регулатора, графична визуализация на преходните процеси в реално време и регистриране на работни параметри, което ще повиши допълнително функционалността и приложимостта на разработения HMI модул.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

ЛИТЕРАТУРА

[1] https://inductiveautomation.com/resources/article/what-is-hmi

[2] Astrom K.J., Hagglund T. – PID Controllers: Theory, Design and Tuning. Instrument Society of America, 1995.

[3] a-Si TFT LCD Single Chip Driver 240RGBx320 Resolution and 262K colour, Datasheet, Version: V100, Document No.: ILI9341V_DTS_V100_20130423.

[4] XPT2046 Datasheet – 4-Wire Touch Screen Controller. Shenzhen XPTEK Technology, 2007.

[5] ESP32 Series, Datasheet, file:///C:/Users/Iliya%20Nedelchev/Downloads/ESP32-1.PDF

[6] Espressif Systems – ESP32 Technical Reference Manual. Version 5.1, 2023. https://docs.espressif.com

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

МИКРОСТРУКТУРНА ХАРАКТЕРИСТИКА И ФАЗОВИ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРИ ЕЛЕКТРОННО ЛЪЧЕВО ЗАВАРЯВАНЕ НА КАРБИДО-БЕЙНИТЕН ЧУГУН СЪС СТОМАНА AISI 316L

MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION AND PHASE TRANSFORMATIONS OF DISSIMILAR CARBIDIC AUSTEMPERED DICTILE IRON/ AISI 316L STAINLESS STEEL ELECTRON BEAM WELDS

Milka Atanasova
TU-Gabrovo
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract
This study investigates the microstructural characteristics and phase transformations in dissimilar joints between carbidic austempered ductile iron (CADI) and AISI 316L austenitic stainless steel produced by electron beam welding (EBW). The welding process is conducted using an Evobeam Cube 400 system under a high vacuum of 5.10^{-4} mbar at a welding speed of 400 mm/min, utilizing a 0.2 mm beam offset toward the stainless-steel side without thermal oscillation or filler metal. Microstructural characterization is performed using a complex approach combining scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive x-ray spectroscopy (EDS), and x-ray diffraction (XRD). SEM-BSE examinations reveal a fine cellular-dendritic solidification structure within the fusion zone, along with intense dissolution of graphite nodules and the subsequent formation of a fine ledeburite eutectic and acicular secondary carbides within the partial melting zone on the CADI side. Combined EDS elemental distribution analysis indicates a pronounced diffusion gradient across the joint interface, demonstrating structural heterogeneity without any defects such as microcracks or pores. Comparative XRD analysis confirms that the high-temperature austenite phase (γ-Fe) with a face-centered cubic lattice remains the dominant matrix component in the weld, accompanied by the precipitation of martensitic-ferritic phases with a body-centered cubic lattice (α-Fe) and carbide phases of the ($M_{23}C_6$) type within the interdendritic spaces. The results provide critical insights into managing structural homogeneity and phase evolution in high-performance dissimilar cast iron-to-steel joints.

Keywords: Electron beam welding; CADI; AISI 316L stainless steel; Phase transformations; EDS layered image; XRD analysis.

ВЪВЕДЕНИЕ

В съвременното машиностроене създаването на надеждни разнородни съединения между чугуни и стомани е от съществено значение за производството на хибридни компоненти, съчетаващи висока износоустойчивост, корозиоустойчивост и пластичност [1, 2]. Високата плътност на енергията при електроннолъчево заваряване предизвиква мигновено локално стопяване при минимално специфично топлоотдаване, което обуславя екстремни температурни условия в зоната на заваряване [3, 4].

Тези физико-металургични условия оказ-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

ват силно влияние върху структурните трансформации в двата базови материала [5, 6]. В зоната на частично стопяване от страната на карбидо-бейнитния чугун (CADI) термичният цикъл предизвиква частично разтваряне на графитните включения и формиране на метастабилни ледебуритно-карбидни структури [7, 8]. Същевременно, в зоната на термично влияние на CADI температурата остава под тази на солидуса, като там протича предимно аустенитизация и последващо мартензитно превръщане на бейнитната матрица, без графитът да се разтваря в течна фаза [9]. От страната на стоманата AISI 316L термичното въздействие може да индуцира процеси на локална сенсибилизация [10].

Формирането на тези коренно различни и структурно хетерогенни зони създава висок риск от концентриране на остатъчни напрежения и поява на заваръчни дефекти [11, 12]. Поради това, за ограничаване на неблагоприятните фазови изменения и предотвратяване на пукнатинообразуването при съединяване на чугуни към стомани, се прилагат технологични подходи като предварително термично въздействие, управление на траекторията на лъча или използване на междинни бариерни слоеве [13, 6]. Въпреки наличните решения, особеностите на структурообразуването и фазовите превръщания при електронно-лъчево заваряване на карбидо-бейнитен чугун към аустенитна стомана AISI 316L без допълнително технологично въз-действие все още не са детайлно изяснени в литературата.

В тази връзка, целта на настоящото изследване е да се анализират микро-структурните изменения и фазовите трансформации в заваръчното съединение при електронно-лъчево заваряване на тези разнородни материали, като въз основа на комплексни SEM, EDS и XRD анализи се дефинира характерът на преразпределение на елементите и структурообразуването в зоните на свързване [1].

ИЗЛОЖЕНИЕ

- *Материали и методи*

Изходните образци от CADI и аустенитна неръждаема стомана AISI 316L са с химичен състав, представен в табл. 1. Особеностите в микроструктурата, фазовия състав и свойствата на използвания карбидо-бейнитен чугун са детайлно проучени в предходни изследвания на авторския колектив [1]. Преди заваряването те се обработват механично под формата на правоъгълни заготовки с размери 10 x 10 x 50 mm. Челните повърхности се шлифоват и се почистват за отстраняване на повърхностни замърсявания и оксиди, с което се осигурява необходимата чистота на контактната зона преди позиционирането им в работната камера.

Табл.1. *Химичен състав на използваните материали*

Мат.	C, %	Si, %	Mg, %	B, %	Mn, %	Cr, %	Mo, %	Ni, %
CADI	3,5	2,3	0,03	0,13	-	-	-	-
316L	0,03	0,75	-	-	2,0	16,0-18,0	2,0-3,0	10,0-14,0

За получаване на монолитно съединение от избраните разнородни материали се използва система за електроннолъчево заваряване Evobeam Cube 400, чиито технически характеристики са детайлно описани в литературата [12]. Процесът се извършва в условия на висок вакуум с работно налягане от 5.10^{-4} mbar, без предварително подгряване и добавъчен метал. За оптимизиране на топлинния баланс и контролиране на степента на стопяване, оста на електронния лъч се позиционира с асиметрично изместване от 0,2 mm към неръждаемата стомана AISI 316L. Въз основа на предходни изследвания [1] се избират следните технологични параметри: ускоряващо напрежение U=60 kV, ток на фокусиране I_f= 1510 mA (на повърхността), ток на лъча I_b = 20 mA и скорост на заваряване V=400 mm/min, като процесът протича без термична осцилация. По този начин се

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

осигурява постоянна стойност на въведената специфична енергия, гарантираща съпоставимост на микроструктурните резултати.

Подготовката на напречни металографски микрошлифове се извършва чрез отрязване на проби перпендикулярно на заваръчния шев и последващото им включване в епоксидна смола. Провежда се ръчно шлифоване с шкурки от силициев карбид в диапазона от P500 до P2500, последвано от финишно полират с диамантна паста DiaMax. Структурата в зоните на съединението се разкрива чрез диференцирано химическо ецване: с царска вода за неръждаемата стомана AISI 316L и с 2%-ов разтвор на нитал за CADI и зоната на сплавяне.

Така обработените образци с проявена микроструктура се подлагат на последващи детайлни физико-металургични изследвания.

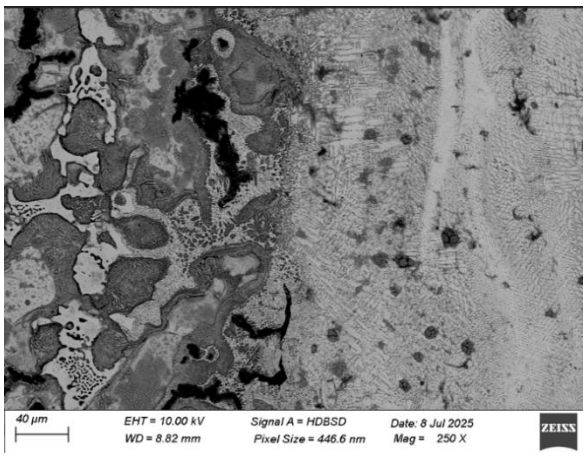
Така обработените образци с проявена микроструктура се подлагат на последващи физико-металургични изследвания.

За проучване на морфологията на кристализация, елементното разпределение и фазовия състав в зоната на съединяване се прилага комплексен подход, включващ сканираща електронна микроскопия (SEM), енергодисперсионен рентгеноспектрален микроанализ (EDS) и рентгенофазов анализ (XRD). Използването на високоразделителна електронна микроскопия позволява качествена оценка на структурните изменения на границата между двата материала, докато EDS микроанализът дава количествено потвърждение за дифузионните процеси във ваната. На свой ред, рентгенофазовият анализ (XRD) служи за експериментално идентифициране на фазовия състав на шева, формиран в резултат на заваръчния термичен цикъл.

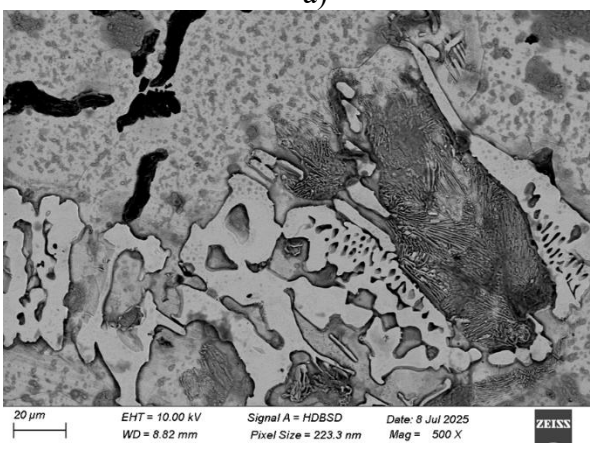
- *Получени резултати*

На фиг. 1 а и б са представени SEM-BSE микрографии на преходната зона при увеличение съответно 250X и 500X.

На фиг. 1а е представена SEM микрография на преходната зона в режим на обратно разсеяни електрони (BSE), демонстрираща общия характер на границата на сплавяне при увеличение 250X.



а)



б)

***Фиг. 1**. SEM-BSE микрографии на преходната зона при електроннолъчево заваряване на CADI със стомана AISI 316L: а) общ изглед на границата на сплавяне (250X); б) детайлна морфология на евтектичните и карбидните фази в зоната на частично стопяване (500X)*

В дясната част на изображението се наблюдава самият заваръчен шев (зоната на сплавяне), който се характеризира с добре развита, фина клетъчно-дендритна структура. Светлите дендрити растат насочено в посока на максималния температурен градиент. Междудендритните пространства показват обогатяване с легиращи елементи, изтласкани по време на ускорената криста-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

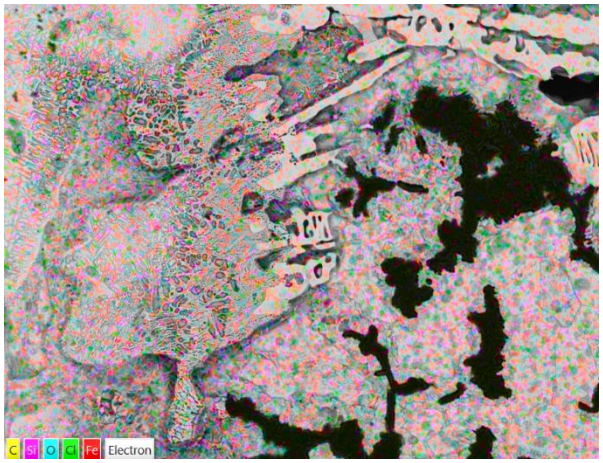
лизация.

За детайлно проучване на фазовата морфология в зоната на частично стопяване, на фиг. 1б е показана микроструктурата при увеличение 500X. Наблюдава се формирането на фино-дисперсна ледебуритна евтектика, разположена в централната част на микрографията. Тя се характеризира с редуване на пластинчати (ламеларни) карбидни и аустенитни фази. Бързото охлаждане след електронно-лъчевото въздействие фиксира тази метастабилна структура, възникваща поради локалното пренасищане на стопилката с въглерод, дифундирал от разтворените графитни включения. Около евтектичните участъци се обособяват по-масивни, светли аустенитно-мартензитни дендрити с хетерогенен състав, по чиито граници се забелязва отделяне на фини иглести вторични карбиди.

С цел количествено и качествено проследяване на дифузионните процеси на границата между двата различни материала, се извършва рентгеноспектрален микроанализ (EDS mapping). На фиг. 2 е представено изображение на елементното разпределение (*EDS Layered Image*), което илюстрира химическата хетерогенност в заваръчния шев.

Наблюдава се ясен дифузионен градиент на основните компоненти в интерфейсната област. Хромът и никелът, произлизащи от аустенитната неръждаема стомана AISI 316L, дифундират към централната зона на ваната, като тяхната концентрация закономерно намалява по посока на чугуна. Същевременно, въглеродът и силицият от страната на карбидо-бейнитния чугун се разпределят в течната фаза, като зоните с максимално натрупване на въглерод съвпадат изцяло с контурите на частично разтворените графитни сфероиди. Повишената концентрация на въглерод и хром в междудендритните пространства на шева потвърждава термодинамичните условия за кристализация на финодисперсна ледебуритна евтектика и отделянето на иглести вторични карбиди, регистрирани при високите увеличения.

За експериментално потвърждаване на новообразуваните кристални структури и фази, възникващи в резултат на локалните изменения в химичния състав, се провежда рентгенофазов анализ.



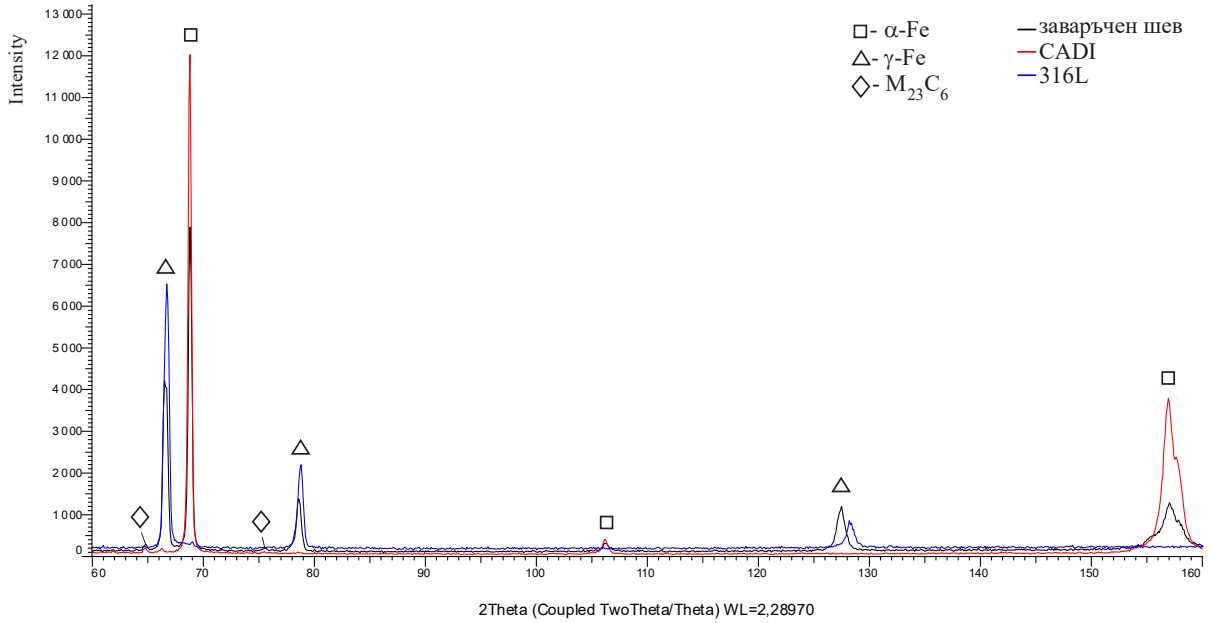
Фиг.2. *Комбинирано изображение на елементното разпределение (EDS Layered Image) в зоната на съединяване между CADI и стомана AISI 316L*

На фиг. 3 са представени наслоените дифракционни спектри на базовите материали (CADI и стомана AISI 316L) и на получения заваръчен шев. Сравнителният анализ позволява точно проследяване на фазовата еволюция в зоната на свързване. Дифракционната линия на неръждаемата стомана индикира доминираща еднофазна аустенитна структура γ-Fe, чиито основни интензивни пикове се регистрират при ъгли $2\theta \approx 66{,}5^{\circ}$ и $2\theta \approx 79{,}5^{\circ}$. Тази фаза притежава стенноцентрирана кубична решетка. От друга страна, спектърът на карбидобейнитния чугун отразява хетерогенния характер на неговата изходна матрица, характеризираща се с изключително интензивен пик на α-Fe с обемноцентрирана кубична решетка при $2\theta \approx 68{,}5^{\circ}$, съпътствана от остатъчен аустенит.

Дифракционният спектър на заваръчния шев отразява фазовите изменения, настъпващи при взаимното участие на двата мате-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

риала във формирането на шева. В него се наблюдава припокриване на аустенитните максимуми γ-Fe, което потвърждава запазването на стенноцентрираната кубична решетка в структурата на шева.



***Фиг. 3**. Сравнителни XRD дифрактограми на изходните материали (CADI и стомана AISI 316L) и на заваръчното съединение*

Поради интензивното преразпределение на елементите във ваната и високата скорост на охлаждане се регистрира промяна в интензитета и уширяване на профила на пиковете. Заваръчният термичен цикъл обуславя появата на мартензитно-феритни трансформационни продукти, притежаващи обемноцентрирана кубична решетка α-Fe при 2θ≈127,5°. Локалното обогатяване на заваръчната вана с въглерод и хром води до формиране на допълнителни дифракционни максимуми с по-нисък интензитет при по-малките ъгли на дифракция 2θ≈64° и 2θ≈75°. Дифракционните максимуми за карбидната фаза ($M_{23}C_6$) потвърждават нейното присъствие в междудендритните пространства, което съответства на наблюдаваната при сканиращата електронна микроскопия структура.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Въз основа на проведените комплексни физико-металургични изследвания на разнородни съединения между CADI и неръждаема стомана AISI 316L, получени чрез електроннолъчево заваряване, могат да бъдат направени следните основни изводи:

- Използването на система за електроннолъчево заваряване Evobeam Cube 400 при скорост от 400 mm/min, висок вакуум 5.10^{-4} mbar и асиметрично изместване на лъча от 0,2 mm по посока на стоманата осигурява плътно, непрекъснато и хомогенно свързване на двата материала без наличие на заваръчни дефекти като микропукнатини или пори в зоната на сплавяне.
- Сканиращата електронна микроскопия (SEM) и комбинираното изследване на елементното разпределение (EDS) разкриват формирането на фина клетъчно-дендритна кристализационна структура в мета-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

ла на шева с изразен дифузионен градиент на легиращите елементи. В зоната на частично стопяване от страната на чугуна се наблюдава интензивно разтваряне на графитните включения, което води до локално пренасищане на стопилката с въглерод и последващо образуване на финодисперсна ледебуритна евтектика и иглести вторични карбиди.

- Рентгенофазовият анализ експериментално потвърждава измененията във фазовия състав в зоната на съединяване. Въпреки сложното физико-металургично взаимодействие и високата скорост на охлаждане, високотемпературната аустенитна фаза (γ-Fe), със стенноцентрирана кубична решетка се запазва като доминираща матрица в шева, придружена от появата на допълнителни рентгенови максимуми на мартензито-феритни фази с обемноцентрирана кубична решетка (α-Fe) и карбидни фази от типа ($M_{23}C_6$) в междудендритните пространства.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] Atanasova, M., et al. "Weldability of AISI 316L Stainless Steel and Carbidic Austempered Ductile Iron Using Electron Beam Welding Technology." *Engineering for Rural Development*, Vol. 24, 2025/2026, pp. 112-119.

[2] Colegrove, P. A., et al. "Electron beam characterisation methods and devices for welding power density control." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 215, 2015, pp. 67-79.

[3] Petrov, P., et al. "Electron beam welding of pressure vessels and simulation of thermal-metallurgical fields." *Electrotechnica & Electronica (E+E)*, Vol. 53, 2018, pp. 45-51.

[4] Atanasova, M., Valkov, S., et al. "X-ray diffraction phase analysis and electron beam interaction zones in highly alloyed heterostructures." *Proceedings of International Scientific Conference UNITECH*, 2022, pp. 69-74.

[5] Duncheva, G., Dunchev, V., Atanasova, M., et al. "Effects of Electron Beam Hardening Parameters on the Residual Stresses and Microstructures in C45 Steel Cylindrical Specimens." *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, Vol. 10, 2026, p. 44.

[6] Schultz, H. *Electron Beam Welding*. Woodhead Publishing, 1993, pp. 42-58. ISBN: 9781855730502.

[7] Pascual, M., et al. "Microstructural evolution at the interface zone of welded steel-to-cast iron hybrid components." *Materials & Design*, Vol. 30, 2009, pp. 1960-1966.

[8] Zhou, Y., et al. "Carbon diffusion and chromium sensitization at the fusion boundary of dissimilar joints." *Welding Journal*, Vol. 85, 2006, pp. 121-128.

Węglowski, M. S., et al. "Electron beam welding – Techniques and trends – Review." *Vacuum*, Vol. 130, 2016, pp. 72-92.

[9] Chen, Y., et al. "Bonding characteristics and interface metallurgy of spheroidal graphite cast iron and steel dissimilar joints." *Vacuum*, Vol. 77, No. 3, 2005, pp. 295-301.

[10] Kah, P., et al. "The electron beam welding of dissimilar materials - case study on fusion zones." *Reviews on Advanced Materials Science*, Vol. 47, No. 1, 2016, pp. 40-52.

[11] Duncheva, G. V., Todorov, V., Atanasova, M., Rashev, G. "Modelling, Research and Optimization of Mechanical Properties of Carbidic Austempered Ductile Iron." *Journal of the Technical University of Gabrovo*, Vol. 62, 2021, pp. 12-18.

[12] Valkov, S., Atanasova, M., et al. "Electron Beam Welding of Dissimilar Ti6Al4V and Al6082-T6 Alloys by Utilizing a Scanning Beam." *Metals*, Vol. 13, No. 7, 2023, p. 1252.

[13] Valkov, S., Atanasova, M., et al. "Electron-Beam Welding of Dissimilar Cu and Al6082-T6 Alloys: Microstructural Evolution and Mechanical Properties." *Metals*, Vol. 12, No. 12, 2022, p. 1757.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

АНАЛИЗ НА ТЕХНОЛОГИЧНИТЕ ВЪЗМОЖНОСТИ НА СТРУГО-ФРЕЗОВИ ЦЕНТЪР С ЦИФРОВО ПРОГРАМНО УПРАВЛЕНИЕ „РАЙС“ Т2500, ЗА ОСИГУРЯВАНЕ ПОСТОЯННИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ОБРАБОТЕНАТА ПОВЪРХНИНА, ПРИ СТРУГОВАНЕ НА ПРОФИЛНИ ПОВЪРХНИНИ

ANALYSIS OF THE TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF A CNC MILLING AND TURNING CENTER "RAIS" T2500, TO ENSURE CONSISTENT CHARACTERISTICS OF THE MACHINED SURFACE WHEN TURNING PROFILED SURFACES

Kalin Anastasov
Technical University of Gabrovo, BG

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

Abstract

In various machining processes—turning, milling, drilling, and others—the technological characteristics of the machined surface, such as roughness, microhardness, residual stresses, and others, are influenced by the cutting parameters, the geometry of the cutting tool, the conditions under which the process takes place, and the machine tool. Some of these parameters remain constant during the cutting process, but others, such as the tool setting angles and cutting speed when machining profiled surfaces, change dynamically, resulting in a machined surface with varying parameters. When turning on conventional CNC lathes, it is possible to maintain a constant cutting speed, but due to the kinematic limitations of the machines, the tool angles change dynamically during the machining process. These kinematic limitations are reduced in turning-milling machines, which allow, to a certain extent, for maintaining constant tool angles during the turning of profiled surfaces. This article examines the technological capabilities of the Reis T2500 turning-milling center for ensuring constant machining parameters during the turning of profiled surfaces and the specific considerations involved in selecting cutting tools.

Keywords: *turning, cutting parameters, profiled surfaces .*

ВЪВЕДЕНИЕ

В процеса на струговане на профилни ротационни повърхнини, върху конвенционални металорежещи машини с ЦПУ, поради променливата геометрия на обработваната повърхнина (наличие на конусни и радиусни участъци и разлики в диаметрите), се получава изменение на някои от елементите режима на рязане (скорост V_c), елементите на срязвания слой и геометричните елементи на инструмента, поради динамичното изменение на установъчните ъгли. Известно е, че процесът на обработване, чрез рязане на материалите оказва силно въздействие върху повърхностните характеристики на обработената повърхнина, поради физико -механичните промени, които настъпват в повърхностния слой,

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

а именно[1,2,3]:

- Геометрични промени – грапавост;
- Уякчаване – повишена твърдост и намалена пластичност;
- Остатъчни напрежения – силите на рязане и топлинно въздействие в зоната на рязане генерират напрежения (опънови или натискови), които при неправилни режими могат да причинят деформации в детайла, а също така и да доведат до промени в устойчивостта на умора в процеса на експлоатация;
- Термични промени - високите температури в зоната на рязане водят до отвръщане или образуване на т.нар. "вторични закалени слоеве", което влошава якостта;

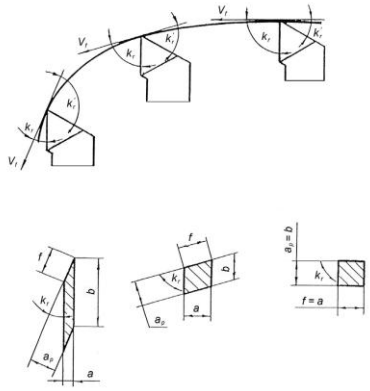
При обработване на профилни повърхнини, върху конвенционални стругови машини с цифрово-програмно управление, в следствие динамичното изменение на установъчните ъгли и скоростта на рязане, обработената повърхнина не е с еднакви характеристики по целия профил. Това води до променливо поведение по време на експлоатация на изделието. При този тип машини поради кинематични ограничения е възможно само да бъде зададена като константа, само една от променливите – скоростта на рязане V_C. другата променлива – зададените установъчни ъгли, не могат да бъдат компенсирани в процеса на рязане. Този недостатък на металорежещата машина може да бъде компенсиран, чрез използване на струго-фрезови центри, с повишени кинематични възможности (допълнителни управляеми оси на инструмента).

Цел на статията е анализ на технологичните и кинематични възможности на струго-фрезови център „РАЙС“ Т2500, за осигуряване на изотропни характеристики на обработената повърхнина при струговане на профилни повърхнини.

ИЗЛОЖЕНИЕ

➢ Обработване на профилни повърхнини върху конвенционални машини с ЦПУ – особености на обработката

При струговане на профилни повърнини (криволинейни, конусни, стъпални и и други), върху конвенционални стругове с ЦПУ, има процес на рязане с променливи характеристики. Това се дължи на кинематичното ограничение на режещия инструмент да заема постоянни установъчни ъгли в процеса на обработването (движение на инструмента само по две оси x и y). На фигура 1 е представен пример за обработка на криволинейна повърхнина и измененията които настъпват в следствие на това.



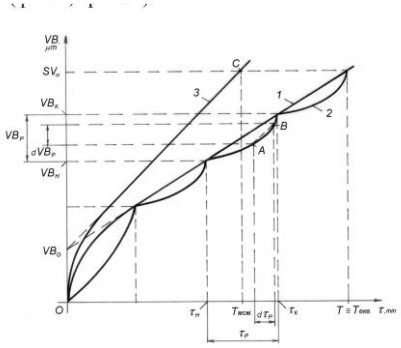
***Фиг. 1**. Динамично изменение на установъчните ъгли и сечението на срязвания слой, при обработване на криволинейна повърхнина*

В зависимост от вида на повърхнината (външна или вътрешна), направлението на подаването *f* (*vf = f.nc)* непрекъснато се изменя. Главният установъчен ъгъл *kr* намалява, а спомагателният *kr*’ нараства. При намаляване на ъгъла, широчината на срязвания слой метал *b* нараства, а дебелината му *a* намалява, като номиналната площ на срязвания слой метал остава постоянна: *K = apf = ab* [4].

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

При движението на ножа по криволинейна траектория се наблюдава изменение на силите на рязане, в резултат на влиянието на *a* и *b* върху главна съставна на силата на рязане *($F_z=C_{Fz}.a^{0,75}.b$)*. Изменението на установъчните ъгли, влияе върху грапавостта на обработваната повърхнина и на направлението на движение на стружката, което е перпендикулярно към диагонала на сечението на срязвания слой метал. От ъгъла на движение на стружката зависи действителният преден ъгъл на ножа и съотношението на съставните на силите на рязане Fx и Fy.

Този променлив режим на рязане, освен върху обработената повърхнина и силите на рязане, оказва и пряко влияние върху трайността на режещите инструменти. На фигура 2 е представена крива на износване при постоянен и променлив режим на рязане.



***Фиг. 2**. Крива на износване на инструментите (1-при постоянен режим на рязане; 2-при променлив режим на рязане; 3-при постоянен моментен режим на рязане, съответстващ на режима 2 в момента dτ)*

Друг съществен недостатък, при обработването чрез струговане на профилни повърхнини върху конвенционални машини с ЦПУ е променливата скорост на рязане

➢ **Обработване на профилни повърхнини върху 5 осни обработващи центри с ЦПУ – особености на обработката**

При струговане на профилни повърхнини върху 5 осни струго – фрезови центри, поради наличието на по – голям брой едновременно управляеми оси има възможност за динамично компенсиране на установъчните ъгли и позволява непрекъснато преориентиране на инструмента спрямо детайла. Това предотвратява сблъсъци, оптимизира дебелината на стружката, минимизира вибрациите и компенсира грешките от радиуса на върха. Този процес се реализира, посредством следните възможности софтуерни и кинематични възможности на машината:

- **Управление по вектори (Tool Vector Input):** Вместо да се програмират точните ротационни ъгли на въртящите оси, се задава вектор, който указва посоката на инструмента. CNC контролерът изчислява в реално време необходимите ротации, за да поддържа правилния установъчен ъгъл спрямо профила. [
- **3D Радиус Компенсация (3D Tool Radius Comp):** За разлика от 3-осното струговане, при 5-осното съвременните системи използват усъвършенствана 3D корекция на радиуса, за да коригират профила при износване на инструмента или промяна в ъгъла.
- **Динамични функции на ЦПУ (Dynamic Precision):** Функции като Dynamic Precision на Heidenhain оптимизират кинематичното поведение, намалявайки отклоненията и вибрациите, възникващи при бързите компенсационни движения

В следствие приложението на тези възможности се постигат следните предимства на този вид машини:

- **Оптимизиране на рязането:** Чрез накланяне на инструмента се променя главният установъчен ъгъл, с което се регулират силите на рязане и широчината/ дебелината на стружката
- **Управление на сблъсъци:** Много CAM системи (напр. PowerMill и NX

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

CAM) притежават автоматични опции (Lead/Lean), които накланят инструмента динамично, за да избегнат контакт на държача с обработваната повърхност.

- **Предотвратяване на сингулярности:** Използването на векторни трансформации и оптимизирани алгоритми (като dual NURBS) предотвратява резките движения на ротационните оси (особено C-оста) в "мъртвите точки" (точките на смяна посоката или направлението на движение, оставящи видими следи върху обработената повърхнина).

Струговият център RAIS TM 2500 (фигура 3), разполага с 5 управляеми оси, 3 от които линейни (X, Y, Z) и две ротационни (B и SP3).

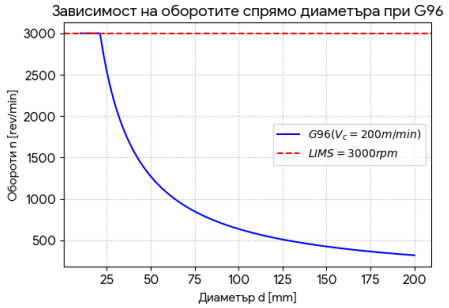
***Фиг. 3**. Струго-фрезови център с ЦПУ, марка* “РАЙС“, мод. T2500

Машината е оборудвана с цифрово програмно управление на фирмата Siemens. За осигуряване на постоянни условия в процеса на рязане (постоянни скорост на рязане и установъчни ъгли), се използват следните команди и функции на машината:

- **Поддържане на постоянна скорост на рязане (VCO) чрез G96:**

При комбинираните машини RAIS, където детайлът може да се върти в C-ос (режим струговане), поддържането на постоянна скорост е ключово за избягване на вибрации и микронеравности.

- **Команда G96:** Системата автоматично регулира оборотите на шпиндела спрямо текущата X-позиция на инструмента. Графика на функцията $n(V_c) = f(D)$, е представена на фигура 4 .
- **Предимство за RAIS:** Позволява еднакво качество на обработка от периферията до центъра на детайла, което е критично при челно струговане на големи фланци.



***Фиг. 4**. Графика на функцията $n(V_c) = f(D)$*

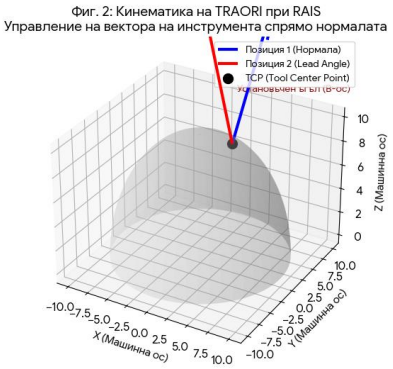
- **Поддържане на постоянен установъчен ъгъл (Orientation Control):**

При мултитаскинг машините RAIS с наклоняема глава (B-ос) или въртяща се маса, поддържането на ъгъла на инструмента спрямо нормалата на повърхнината се реализира чрез функциите за 5-осна трансформация.

- **TRAORI (Tool Center Point Control - TCPM):**
  - Това е най-важната функция за машините RAIS. Когато TRAORI е активна, NC-кодът се програмира спрямо върха на инструмента, а не спрямо центъра на осите.
  - Системата автоматично компенсира движенията на линейните оси (X, Y, Z), докато въртящите оси (B, C) се движат, за да поддържат **постоянен ъгъл на рязане**.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

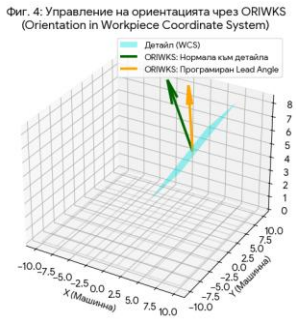
Визуализация на позицията на върха на инструмента при обработване на профилна повърхнина при използване на функцията TRAORI е представена на фигура 5.



***Фиг. 5**. Визуализация на позицията на върха на инструмента при обработване на профилна повърхнина при използване на функцията TRAORI*

- **ORIWKS (Orientation in Workpiece Coordinate System):** Позволява дефиниране на ориентацията на инструмента директно в координатната система на детайла.

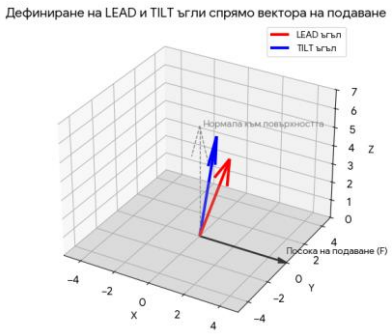
На фигура 6 е представено дефинирането ориентацията на инструмента спрямо координатната система на детайла.



***Фиг. 6**. Дефинирането ориентацията на инструмента спрямо координатната система на детайла при използване на функцията ORIWKS.*

- **LEAD и TILT:** Команди за програмиране на ъгъл на изпреварване и страничен наклон, които гарантират, че режещият ръб контактува с материала в оптималната точка.

На фигура 7 е представено графично интерпретиране при програмиране ъгъла на изпреварване и страничния наклон, при използване на командите LEAD и TILT**.**



***Фиг. 7**. Визуализация при програмиране ъгъла на изпреварване и страничния наклон, при използване на командите LEAD и TILT.*

- **Технологичен цикъл CYCLE800 (Swivelling)**

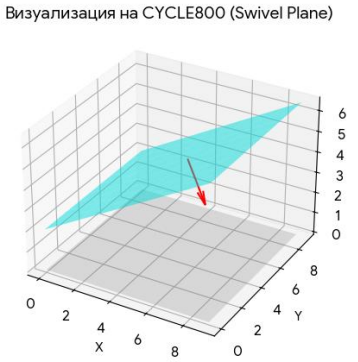
За разлика от динамичното TRAORI, при RAIS често се използва CYCLE800 за т.нар. „3+2“ обработка.

- Той позволява завъртане на координатната равнина под определен ъгъл.

- **Управление на ъгъла:** Чрез параметъра _FR (Frame) се гарантира, че инструментът ще остане перпендикулярен (или под фиксиран ъгъл) към наклонена равнина, което е фундаментално за фрезовите операции в мултитаскинг режим.

На фигура 8 е представено визуализация при използване на технологичния цикъл CYCLE800 (Swivelling).

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие



***Фиг. 8**. Визуализация на технологичния цикъл CYCLE800 (Swivelling).*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статията е извършен анализ на недостатъците при обработване на профилни повърхнини, чрез струговане с конвенционални стругове с ЦПУ, по отношение на динамичното изменение на установъчните ъгли и скоростта на рязане върху обработената повърхнина. Разгледани са възможностите за компенсиране на тези недостатъци при използване на 5 осни струго – фрезови центри с ЦПУ. Разгледани са възможните команди и цикли на струго – фрезовия център РАЙС мод. Т2500, за обработване на профилни повърхнини осигуряващи еднакви условия на процеса на рязане. На базата на технологичните възможности на машината са проектирани технологични процеси за изработване на епруветки тип „Пясъчен часовник“, за изследване устойчивостта на умора. Пробните тела произведени, чрез използването на тези цикли са с постоянни характеристики на обработената повърхнина, гарантиращи по – голямата прецизност на изследванията, които са предназначени

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] Vachev A.A. Sintez i analiz na kinematichni shemi na ryazane pri vurtyashti se instrument i zagotovka. P. TU-Plovdiv, 1998..

[2] Maximov J.T. Forming of cross-profile holes by adding rotations round coplanar axes. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42 (3) (2002) 313-320.

[3] Drujinskii I.A. Slojnie poverhnosti: matematicheskoe opisanie i tehnologicheskoe obezpechenie. Spravochnik. L. Mashinostroenie, 1985.

[4] Metev H., T. Kuzmanov, K. Krumov. Tehnologia na mashinostroeneto (chast II. Tehnologicheski metodi za obrabotvane). “EKS-PRES”, G. 2016, 164 s.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

СИСТЕМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА АКУМУЛАТОРНА БАТЕРИЯ (BMS)

BATTERY MANAGEMENT SYSTEM (BMS)

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

Ivan Simeonov
Technical University of Gabrovo

Hristo Kilifarev
Technical University of Gabrovo

Egnar Özdikililer
Technical University of Gabrovo

Borislav Nedev
Technical University of Gabrovo

Abstract
Electric (EV) and hybrid electric vehicles (HEV) are gaining increasing importance nowadays. A core module in these vehicles is the battery management system (BMS), whose primary tasks are monitoring and managing the battery cells to ensure that EVs are safe, reliable, and efficient. This paper reviews a wide range of BMS functions, including voltage and current monitoring, state-of-charge and state-of-discharge estimation, battery pack balancing and protection, analysis and control of thermal conditions, as well as battery data analysis and diagnostics. The paper also examines trends for the future development of the battery management system.

Keywords: Electric vehicles; Battery management system (BMS); Battery state estimation.

ВЪВЕДЕНИЕ

Неделима част от електрическите и хибридни автомобили (EV и HEV) е системата за управление на батерията (Battery Management System - BMS). Това се дължи на множеството функции, които тя изпълнява:

- Следи за нормалната и безопасна работа на батерийния пакет, съставен от отделни клетки, които имат малък прозорец на разряд/заряд по напрежение и ток спрямо работната температура [1].
- Контролира заряда на батерията (State of Charge - SoC) с цел запазване на нейния „живот“ (State of Health - SoH) [2]. Друг важен параметър на батерията, който BMS следи е State of Power (SoP). Той показва колко мощност може да се консумира/захрани в даден момент от/към батерията и зависи пряко от SoC, SoH и околната температура.
- Балансиране на клетките - поради производствени несъвършенства отделните клетки не са еднакви. BMS регулира посредством шунтове (пасивно балансиране) състоянието на клетката (или група от клетки) или посредством прехвърляне на енергия от клетки с по-голям заряд, към други с по-нисък (активно балансиране) [3]. Това гарантира равномерно зареждане

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

и разреждане на всички клетки, като по този начин се увеличава максимално полезният капацитет на батерията и се удължава нейния експлоатационен живот.

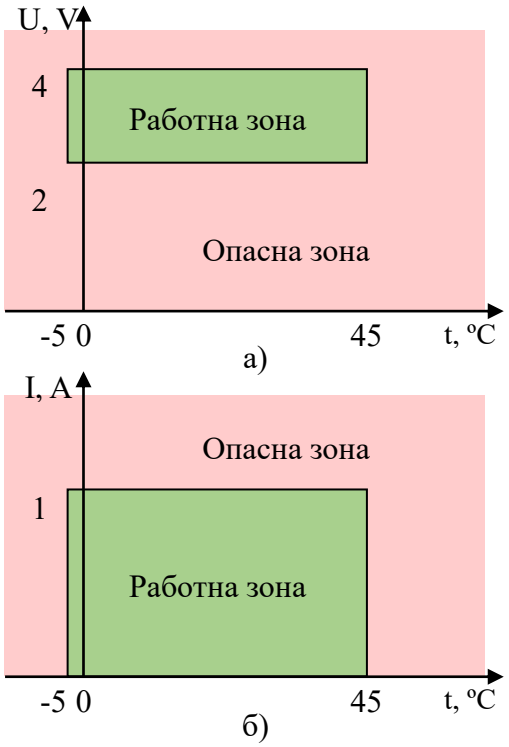
- Безопасност и защита – най-важната задача на BMS е да предотвратява катастрофални повреди, като предпазва от презареждане, преразреждане и термично претоварване.
- Извършва непрекъсната диагностика за повреди – BMS действа като „мозък“ на батерийния пакет, като следи за аномалии в реално време, за да предотврати опасни ситуации като пожар или трайна деградация [4].
- Обработва данни в реално време, като съхранява „историята“ за състоянието на батерията и извежда информацията към потребителя, за да се гарантира безопасността, ефективността и дългия живот на батерийния пакет.

Целта за настоящия доклад е да бъдат описани основните функции, които системата за управление на батерията (BMS) изпълнява, като са представени част от тенденциите за нейното развитие.

ИЗЛОЖЕНИЕ

BMS измерва и управлява разрядния и зарядния ток и напрежение върху отделна клетка или група от клетки и регулира температурата им, като подава различна мощност към/от електромотора в зависимост от състоянието на батерията. На фиг. 1 са показани работните напрежение и ток за отделна литиево-йонна клетка от батерийния пакет в зависимост от нейната температура.

Системата за управление на батерията прави **постоянен мониторинг** (измерване и анализ) на три ключови параметъра – напрежение, ток и температура. По тези параметри се следи за състоянието на заряда (State of Charge - SoC) – това е текущото ниво на заряд в батерията, изразено в проценти от 0% (напълно разредена) до 100% (напълно заредена).



***Фиг. 1**. Работни зони по напрежение а) и ток б) на литиево-йонна клетка [1]*

BMS комбинира няколко метода, за да покаже точен процент на таблото – измерване на напрежението, кулонов брояч (точния ампераж, който влиза или излиза от батерията всяка секунда и го събира/изважда от общия капацитет) и алгоритми на Калман (сложни софтуерни филтри, които коригират грешките от кулоновия брояч в реално време, отчитайки температурата и вътрешното съпротивление) [5].

Друг важен показател, който BMS **анализира** е State of Health (SoH). Той изразява актуалния максимален капацитет на батерията като процент от нейния капацитет, когато е била чисто нова. BMS не може да измери SoH директно с хардуерен сензор. Тя използва сложни математически модели и софтуерни алгоритми, за да го изчисли.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

За разлика от SoC, който показва заряда в проценти и SoH, който оценява остаряването, State of Energy (SoE – Състояние на енергията) и State of Power (SoP – Състояние на мощността) са динамични параметри. BMS ги изчислява в реално време, за да планира енергията за движение и да защити батерията от моментни претоварвания. SoE изразява оставащата налична енергия в батерията, измерена в киловат-часа (kWh) или джаули (J). Реалната енергия (SoE) в батерията е различна в зависимост от температурата и SoH (деградацията). При -5°C батерията съдържа по-малко използваема енергия, отколкото при +25°C, заради забавените химически процеси и промяната в напрежението.

SoP определя максималната мощност (в kW), която батерията може да отдаде или приеме в следващите няколко секунди без риск за безопасността, като зависи от температурата и от SoC. При много студена батерия SoP за зареждане е силно ограничен (явлението "cold gating"). BMS умишлено ограничава регенеративното спиране и бързото зареждане, за да предотврати повреда на анода (литиево покритие). Когато батерията е на 100% SoC, SoP за зареждане пада до нула – няма къде да се приеме нова енергия и колата няма да спира с регенерация. Обратно, при 3% SoC, SoP за разреждане се ограничава драстично, колата влиза в авариен режим („костенурка“) и ви позволява да карате само с ниска скорост.

BMS **защитава** батерията и автомобила чрез три основни линии на защита: електрическа, термична и софтуерна. Тя действа като предпазител, който реагира за милисекунди при засичане на опасност, като предотвратяване на пожар – при повишаване на температурата BMS активира помпата за охлаждаща течност или вентилаторите. Ако охлаждането не се справи, BMS намалява максималния ток (намалява SoP), ограничавайки ускорението и скоростта на зареждане. При критична температура (над 60–65°C) BMS отваря високоволтовите релета (контактори) и напълно изолира батерията, за да спре отделянето на топлина.

BMS също осъществява електрическа защита на клетките – прекъсва зареждането, ако дори само една клетка достигне горния си безопасен лимит (обикновено ~4.2V), за да предотврати нейното структурно разрушаване. Освен това защитава от дълбоко разреждане като изключва консумацията на енергия, преди клетките да паднат под критичния минимум (~2.5V), което би причинило необратими химически повреди и къси съединения при следващ заряд.

BMS следи за резки пикове на тока при късо съединение и моментално задейства пиропредпазител (Pyrofuse), който физически прекъсва веригата чрез малък експлозивен заряд. Освен това тя непрекъснато проверява за утечки на ток между високоволтовата система (400V/800V) и металното шаси на колата.

При катастрофа (удар) BMS (посредством свързаност със системата за въздушните възглавници – Airbag) незабавно изключва главните контактори, предпазвайки пътниците и спасителните екипи.

BMS **управлява енергията** в електромобила чрез динамично разпределение на мощността между батерията, задвижването и спомагателните системи. Нейната цел е да извлече максимален пробег, като същевременно поддържа стабилно напрежение и предпазва клетките от претоварване.

Клетките в батерийния пакет са свързани последователно и паралелно. Енергията може да се управлява ефективно само ако всички клетки са с еднакъв статус. BMS изравнява заряда им, чрез пасивно (посредством резистори) или активно балансиране (прехвърляне на енергия от силно заредени към по-слаби клетки чрез различни схеми) [6]. Без балансиране най-сла-

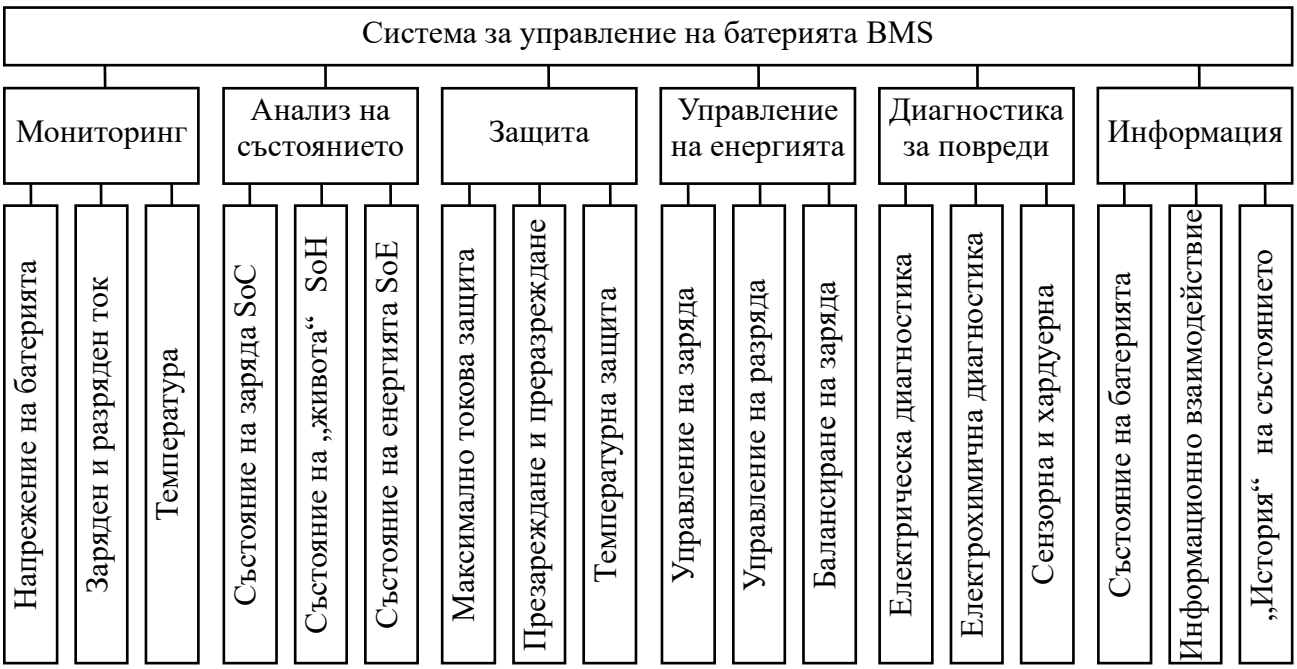
Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

бата клетка би се претоварила първа, което води до прегряване и преждевременно износване на целия пакет.

При включване към зарядна станция (особено бърза DC станция), BMS поема пълния контрол над процеса. Тя изпраща инструкции към станцията точно какво напрежение (V) и ток (A) да подава всяка секунда чрез CAN комуникация. В началото (при нисък SoC) BMS разрешава максимален ток. Със зареждането на батерията и повишаването на температурата, системата постепенно намалява тока (по зарядна крива), за да предотврати литиево покритие (lithium plating) върху анода. По време на движение, когато вдигнете крака си от педала за газта или натиснете спирачката, електромоторът преминава в режим на генератор и връща енергия към батерията. BMS изчислява текущия капацитет за приемане на мощност (Charge SoP). Ако батерията е заредена на 100% или е студена, BMS изпраща сигнал към главния контролер на превозното средство да намали или напълно да изключи регенерацията, прехвърляйки спирачното усилие изцяло към конвенционалните хидравлични спирачки. Обратно, при критично ниско ниво на енергията (SoE) и нисък SoC, BMS може да ограничи максималния капацитет на отоплението или климатика, за да осигури допълнителни километри пробег до най-близката зарядна точка.

BMS извършва три нива на **диагностика** в реално време, като непрекъснато анализира физическите, електрическите и софтуерните параметри на батерията [1]. Целта е незабавно откриване на дефекти и записване на диагностични кодове за грешки (DTC). BMS засича разлики в напрежението между клетките. Голям дисбаланс сигнализира за дефектна клетка с ускорено саморазреждане. Също следи поведението на клетките в покой. Ако дадена клетка губи напрежение по-бързо от останалите, това е признак за вътрешно късо съединение. BMS изчислява вътрешното съпротивление на всеки модул. Рязкото му повишаване показва локално химическо остаряване (влошен SoH).

На фиг. 2 са представени основните функции на BMS [7].



***Фиг. 2**. Функции на BMS [7]*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

BMS обработва, предава и съхранява **информация** чрез специализирана тристепенна електронна архитектура и комуникационни протоколи. Вътре в батерията, върху самите модули с клетки, са монтирани подчинени платки (Cell Monitoring Units - CMU). Те събират аналоговите сигнали за напрежение, ток и температура. Посредством аналогово-цифрово преобразуване (ADC) физическите стойности на тока и напрежението се преобразуват в цифров код с висока точност. Локалните платки (CMU) изпращат събраните цифрови данни към централния компютър на батерията (BMU) по защитени кабелни линии (Изолиран SPI / CAN). Микроконтролерът в BMS прилага сложни алгоритми (например филтри на Калман), за да превърне суровите данни за ток и напрежение в използваеми показатели като оставащ заряд (SoC) и здраве (SoH). BMS разполага със собствена енергонезависима памет, където записва историята на батерията – брой цикли, екстремни температури и кодове за повреди (DTC). Тази „черна кутия“ не се изтрива при изключване на колата.

Най-важните тенденции в развитието на BMS включват:

1. Изкуствен интелект (AI) и машинно обучение – традиционните алгоритми се заменят с AI модели, вградени директно в софтуера на автомобила. BMS анализира индивидуалния стил на шофиране и метеорологичните условия, за да оптимизира консумацията и да удължи живота на клетките. Чрез анализ на фини аномалии в напрежението, AI може да предвиди термичен runaway (самозапалване) дни или седмици преди той да се случи [8].

2. Облачно-свързан BMS (Cloud BMS) и Дигитални близнаци – локалният изчислителен капацитет на колата е ограничен. Затова производителите (като Huawei, Bosch и AVL) внедряват хибридни решения. В облака се създава виртуален дубликат на батерията. Там се изпращат и обработват огромни обеми от данни (Big Data) за цялата история на автомобила. По-точно SoH и оставащ живот: Облачните алгоритми изчисляват деградацията и оставащия полезен живот (RUL) много по-точно от бордовия компютър [9].

3. Безжичен BMS (Wireless BMS / wBMS) – това е една от най-големите хардуерни иновации, вече внедрявана от гиганти като General Motors (платформата Ultium). Комуникацията между главния компютър (BMU) и модулите (CMU) се извършва безжично чрез защитени радиочестотни протоколи. Предимства: Спестява се до 90% от вътрешното окабеляване на батерията. Това намалява теглото на колата, освобождава място за повече клетки, елиминира риска от претрити кабели и улеснява роботите при рециклиране [10].

4. Усъвършенствани сензори в клетките – разработват се сензори, вградени директно вътре в самата клетка (а не само по повърхността ѝ). Те измерват вътрешното налягане, механичното напрежение (подуване) и температурата в ядрото. Интегрирането на EIS (Електрохимична импедансна спектроскопия) хардуер, позволява на BMS да прави "кардиограма" на химическите процеси в реално време, засичайки опасни натрупвания на литий (lithium plating) при бързо DC зареждане.

5. Готовност за нови химии и архитектури – BMS софтуерът се адаптира за управление на твърдотелни батерии [11], които изискват съвсем различни температурни и напреженови профили спрямо сегашните литиево-йонни технологии. При новите архитектури модулите отпадат – клетките се монтират директно в корпуса на батерията или шасито (Cell-to-Pack (CTP) интеграция). BMS се трансформира в силно децентрализирана система, интегрирана в общата електроника на колата.

6. Проследяване и „Втори живот“ (Blockchain & Battery Passport) – заради новите регулации (особено в ЕС), BMS за-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

писва криптирана и защитена история на батерията (цифров паспорт). Когато електромобилът бъде бракуван, купувачът на батерията може веднага да види сертифицираната от BMS история, за да я използва като стационарен буфер за зелена енергия (Second-life applications).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технологиите при системите за управление на батериите (BMS) се развиват с изключително бързи темпове, движени от стремежа към по-голям пробег, по-бързо зареждане и по-висока безопасност на автомобилите. Основната промяна е преходът от пасивен мониторинг към интелигентно, адаптивно управление в реално време [12].

В контекста на кръговата икономика и новите регулации (като Европейския батериен паспорт), ролята на BMS става ключова и след края на жизнения цикъл на автомобила. Чрез съхраняването на надеждна, криптирана история на експлоатацията, системата осигурява законова и техническа готовност за лесното пренасочване на батериите за „втори живот“ (Second-life) в стационарни енергийни системи.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] Hu, R. *Battery Management System For Electric Vehicle Applications*. Master's thesis. Windsor, Canada: University of Windsor, 2011. ISBN 978-0-494-76296-7.

[2] Ramkumar, M. S., et al. Review on Li-Ion Battery with Battery Management System in Electrical Vehicle. *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2022, 2022, Article No. 3379574, pp. 1–8. e-ISSN 1687-8442. DOI: 10.1155/2022/3379574.

[3] Manas, M., R. Yadav, R. K. Dubey. Designing a battery Management system for electric vehicles: A congregated approach. *Journal of Energy Storage*, Vol. 74, 2023, Article No. 109439. DOI: 10.1016/j.est.2023.109439.

[4] Bonnen Battery. What Is a Battery Fault Self-Diagnostic System in Battery Management System (BMS)? *Bonnen Battery*, 2025.

[5] eCarsTrade. Everything You Need to Know About State of Battery Health Certificates. *eCarsTrade*, 2026.

[6] Ashraf, A., et al. Review of cell-balancing schemes for electric vehicle battery management systems. *Energies*, Vol. 17, 2024, Article No. 1271. DOI: 10.3390/en17061271.

[7] Tan, X., et al. Battery Management System and its Applications. Hoboken: Wiley, 2022. ISBN 9781119154006.

[8] Shi, D., et al. Cloud-Based Artificial Intelligence Framework for Battery Management System. *Energies*, Vol. 16, 2023, Article No. 4403. DOI: 10.3390/en16114403.

[9] AVL Software and Functions. Cloud-Based Battery Management System: Optimize Performance & Safety. *AVL Software and Functions*, 2024.

[10] Rahmani, P., et al. Driving the future: A comprehensive review of automotive battery management system technologies, and future trends. *Journal of Power Sources*, Vol. 629, 2025, Article No. 235827. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2024.235827.

[11] PEM Motion. 8 Key Battery Trends Shaping 2026. PEM Motion, 2026.

[12] Electra Vehicles. From Passive to Adaptive: The Rise of AI-driven Battery Management Systems. *Electra Vehicles*, 2024.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

ИЗСЛЕДВАНИЯ В ЛАБОРАТОРИЯ „АВТОМОБИЛНИ МЕХАТРОННИ СИСТЕМИ“ ПРЕЗ ПЕРИОДА 07.2025-06.2026

RESEARCH IN THE LABORATORY "AUTOMOTIVE MECHATRONIC SYSTEMS" IN THE PERIOD 07.2025-06.2026

Krasimir Ambarev[1, 2]
Stiliyana Taneva[1, 2] **Valyo Nikolov[1, 2]**
Atanasi Tashev[1, 2] **Yordan Stoyanov[1, 2]**

Technical University - Sofia, Plovdiv Branch, 25 Tsanko Dyustabanov Str., Plovdiv, Bulgaria [1]
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"[2]

Abstract
The present report summarizes the scientific and research activities conducted during the reporting period in the fields of internal combustion engines, alternative fuels, transport engineering, and material analysis. The published studies include experimental, analytical, and numerical investigations related to the improvement of energy efficiency, reduction of exhaust emissions, optimization of engineering systems, and enhancement of material performance under operating conditions. The obtained results demonstrate the interdisciplinary character of the conducted research and contribute to the development of modern engineering methods for improving the efficiency, reliability, and environmental performance of contemporary mechanical and transport system.

Keywords: internal combustion engines; alternative fuels; CNG; hydrogen; exhaust emissions; finite element analysis; Al–Si alloys; wear behavior; turbocharging systems; numerical simulations; transport engineering; thermal imaging; transport safety; engineering analysis, suspension, arm, elastic characteristic, stiffness, disc brake, temperature, heat flux.

ВЪВЕДЕНИЕ

Все повече изследователи активно работят в насоки, водещи до подобряване на мощностните, икономични и екологични показатели на двигателите с вътрешно горене (ДВГ), както и за оптимизиране на работния цикъл на ДВГ при конвенционалните и хибридни автомобили. Също така активно се разработват числени модели и се провеждат различни експериментални изследвания в областта на управляемостта, устойчивостта и безопасността при движение на транспортните средства.

През отчетния период научноизследователската дейност на колектива беше насочена към широк спектър от инженерни и приложни изследвания в областта на: машинното инженерство, двигателите с вътрешно горене и транспортната техника. Публикуваните научни трудове обхващат експери-ментални, числени и аналитични изследвания, насочени към повишаване на ефективността, надеждността и екологичността на транспортните средства [1–11].

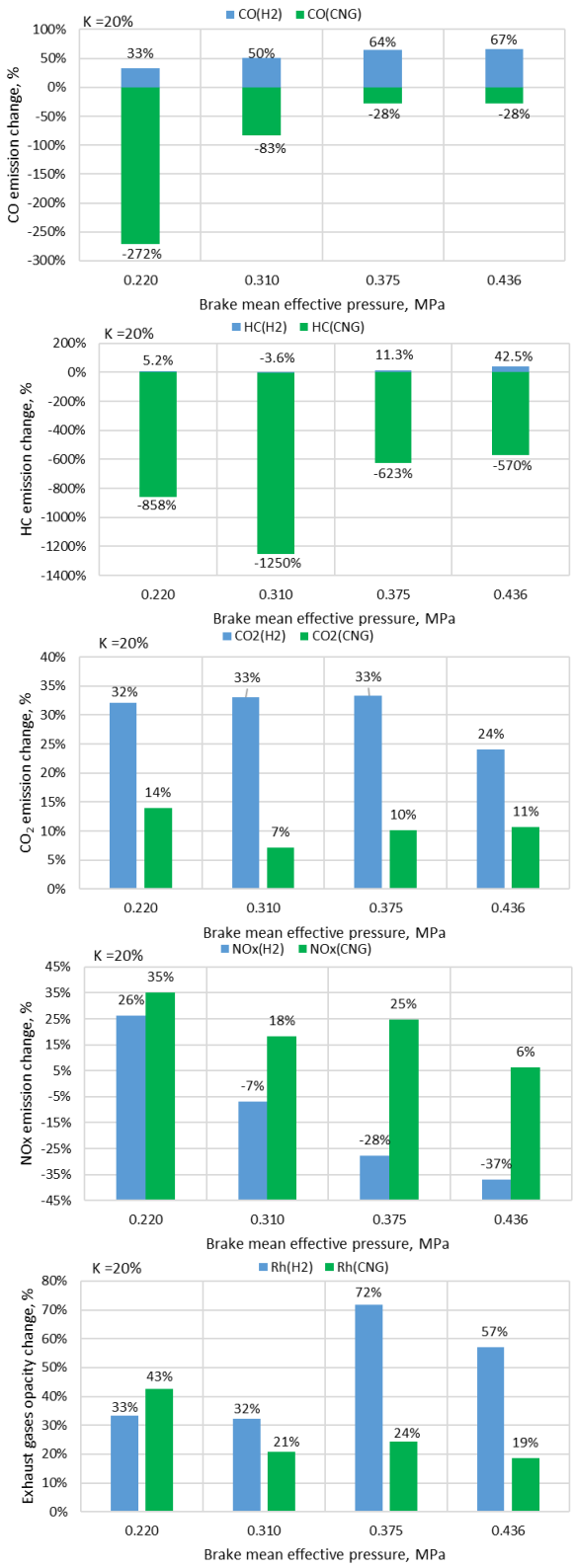
Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

ИЗЛОЖЕНИЕ

Целта на настоящия доклад е да се представят методите и средствата за проведени научни изследвания, свързани както с изследване на мехатронни системи за постигане на по-добри мощностни, икономически и екологични показатели на транспортните средства и техните двигатели, така и за повишаване на устойчивостта, управляемостта и безопастността на движение на транспортните средства.

Част от научноизследователската дейност е насочена към анализ на алтернативни горива и възможностите за намаляване на токсичните емисии при двигатели с вътрешно горене. В публикация [1] е извършено сравнително експериментално изследване на влиянието на компресиран природен газ и водород върху емисионните показатели на едноцилиндров дизелов двигател, работещ по газо-дизелов цикъл. Анализирани са измененията в емиссите на *CO*, CO_2, *HC* и димността на отработилите газове в зависимост от натоварването и вида на използваното газово гориво. На Фиг. 1 е представено сравнението на измерените токсични компоненти при различните режими на работа и постоянно отношение на масовият дял на газовото гориво в общото количество гориво (коефициент *K*), подавано към двигателя [1].

Допълнително са разработени изследвания, свързани с анализ на системи за свръхпълнене при двигатели с вътрешно горене [2], както и симулационни модели на натоварванията в турбокомпресорни системи и силови трактове на транспортни машини [3], [4]. Тези изследвания допринасят за разширяване на приложението на числените методи и инженерния анализ при проектирането и оптимизацията на съвременни технически системи.



***Фиг. 1**. Токсични показатели на дизелов ДВГ, работещ по газо-дизелов цикъл с използване на сгъстен природен газ и водород като газови горива*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Друга част от изследванията е свързана с анализа на Al–Si сплави за бутала на двигатели с вътрешно горене и оценка на тяхното експлоатационно поведение [5], [6]. Проведени са структурни, фазови и числени изследвания с използване на методите на крайните елементи (FEA), както и експериментални изследвания на износването при условия, близки до реалната експлоатация. В публикация [5] е анализирано влиянието на фазовия състав и микроструктурата върху напрегнатото състояние на бутални сплави, като са определени зоните с максимални механични натоварвания. В публикация [6] е извършено сравнително изследване на износоустойчивостта на различни хиперевтектични Al–Si сплави чрез комбиниране на експериментални резултати и числено моделиране. Получените резултати показват, че износоустойчивостта при хиперевтектични Al–Si сплави не зависи само от тяхната твърдост, но и от микроструктурата им.

В областта на транспортната безопасност е проведено изследване върху възможностите за използване на потребителски термални камери за откриване на пешеходци в неосветени пътни участъци [7]. Изследването обхваща градски и извънградски условия, като е анализирана ефективността на инфрачервените системи при различни сценарии на движение и осветеност. Резултатите показват, че използването на термални камери може значително да подобри възможността за ранно откриване на пешеходци и потенциално да допринесе за повишаване на пътната безопасност.

Проведени са изследвания, свързани с конструкцията, параметрите и натоварването на системите за окачване и спирачните механизми на леки автомобили. [8-11]. За повишаване на управляемостта, устойчивостта и безопасността на транспортните средства са определени основни параметри на компоненти на окачвания на леки автомобили [8], [9] и на спирачни механизми на лек автомобил и на мотоциклет [10], [11]. Проведени са експериментални и числени изследвания с използване на метода на крайните елементи (МКЕ) на компоненти и параметри на окачвания и на натоварванията на спирачните механизми на транспортните средства.

През последните години, освен традиционните гумени втулки (тампони) в окачването на автомобилите, приложение намират и полиуретановите втулки. Изследвани са, както механичните характерстики на материала полиуретан, така и еластичните характеристики (коравините) на полиуретанов тампон. Също така са изследвани и някои от параметрите на трептенията при монтирани два гумени (случай I) или гумен и полиуретанов тампони (случай II) на напречен лост (рамо, носач) на полусвещно окачване тип Макферсън.

В табл. 1 са представени резултатите на шестте собствени честоти при двата случая от проведените числени и експериментални изследвания на носач от предно окачване, тип Макферсън.

Таблица 1

Номер на собствена форма	Собствена честота, Hz			
	Случай I		Случай II	
	МКЕ	Експер.	МКЕ	Експер.
1	21.68	22.4	19.97	21.6
2	78.16	92.8	76.77	79.2
3	128.34	134.8	122.89	108
4	134.38	149	127.32	116
5	232.71	233.6	217.5	208
6	250.31	247.6	231.19	226

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

През отчетния период бяха проведени научни изследвания в няколко взаимосвързани направления, касаещи двигателите с вътрешно горене, алтернативните горива, транспортната техника, инженерните симулации и анализа на материали [1–11]. Получените резултати демонстрират ак-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

тивно прилагане на експериментални методи, числено моделиране и инженерни анализи при решаването на съвременни научно-приложни задачи в областта на машиностроенето и транспортната техника.

Изследванията, свързани с използването на алтернативни горива при двигатели с вътрешно горене, показват потенциала на *СПГ* и водорода за намаляване на токсичните компоненти и димността на отработилите газове и подобряване на екологичните показатели на двигателите. Анализите на съвместната работа на дизелов двигател с вътрешно горене и хидродинамичен преобразувател на въртящ момент в силовото предаване на мотокар, както и изследванията на различни системи за свръхпълнене и симулационните модели на турбокомпресорни системи, предоставят възможности за по-задълбочено разбиране на работните процеси и за допълнително оптимизиране на ефективността и експлоатационните показатели на двигателите с вътрешно горене [2–4].

Проведените структурни и трибологични изследвания върху Al–Si бутални сплави предоставят ценна информация относно влиянието на фазовия състав, микроструктурата и механичните свойства върху износоустойчивостта и експлоатационното поведение на материалите [5], [6]. Чрез комбиниране на експериментални изследвания и МКЕ беше постигната добра корелация между числените модели и реалното поведение на материалите при работа.

Проведените изследвания свързани с безопасността и организацията на движението представят възможностите за използване на термални камери за откриване на пешеходци в неосветени пътни участъци и подходи [7].

Изследванията и получените резултати свързани с използването на тампони, изработени от материали с различни механични характеристики в окачванията доказват, че с използването на полиуретанови тампони се удължава експлоатационния ресурс на съответните конструктивни елементи, с което се намаляват и разходите за ремонт и се повиша безопасността при движение на транспортните средства.

Проведените топлинни изследвания на спирачен диск на мотоциклет и получените резултати за разпределение на температурата при различни размери на вентилираните отвори може да се използва, като методика и насоки при проектиране на спирачни механизми с цел повишаване на безопасността им на движение. Получените резултатите за изменението на температурата по повърхността на диска от проведените експериментални и числени изследвания са сравними.

Получените научни резултати и публикуваните трудове потвърждават развитието на научния потенциал на колектива и създават добра основа за бъдещи изследвания, насочени към повишаване на енергийната ефективност, надеждността и екологичните показатели на съвременните инженерни системи.

Благодарности

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] E. Dimitrov, M. Peychev,A. Tashev, Comparative Analysis of CNG and Hydrogen Effects on Exhaust Emissions in Dual-Fuel Single Cylinder Diesel Engines, Eng. Proc. 2026, 121(1), 15; https://doi.org/10.3390/engproc2025121015

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

[2] А. Ташев, А. Танков, Анализ На Различни Системи За Свръхпълнене При Двигателите С Вътрешно Горене, Младежки форум „Наука, технологии, иновации, бизнес“, 2025 – есен, град Пловдив, България, стр. 49-57, ISSN 2367-8569.

[3] Y. Stoyanov, Combined Operation Of A Diesel Internal Combustion Engine And A Hydrodynamic Torque Converter In A Forklift's Powertrain, Младежки форум „Наука, технологии, иновации, бизнес“, 2025 – есен, град Пловдив, България, стр. 38-43, ISSN 2367-8569.

[4] Y. Stoyanov, Simulation Model Of The Limit Loads On Turbine Wheel Of Turbocharger, Младежки форум „Наука, технологии, иновации, бизнес“, 2025 – есен, град Пловдив, България, стр. 44-48, ISSN 2367-8569.

[5] A. Tashev, D.Dimova, B. Dochev, T. Solakov, K. Trojan, Phase Composition of Al–Si Alloys for Internal Combustion Engine Pistons: Finite Element Structural Analysis. Metals 2026, 16(3), 325; https://doi.org/10.3390/met16030325

[6] A. Tashev, V. Nikolov, B. Dochev, D. Dimova, M. Kandeva and M. Zagorski, Comparative Study of Wear Behavior of Hypereutectic Al–Si Piston Alloys Using Experimental and Numerical Methods, 1,2, Materials 2026, 19(11), 2253; https://doi.org/10.3390/ma19112253.

[7] Y. Stoyanov, A. Tashev, P. Mitev, Feasibility of Infrared-Based Pedestrian Detectability in Unlit Urban and Rural Road Sections Using Consumer Thermal Cameras, Vehicles 2026, 8(3), 61; https://doi.org/10.3390/vehicles8030061

[8] С. Танева, Изследване на компоненти и параметри на окачвания на леки автомобили, Механика на машините, година XXXIV, бр. 135, книга 2, 2026, стр. 17-25, ISSN 0861-9727.

[9] Г. Попов, С. Танева, С. Пенчев. Анализ на задно трапецовидно окачване на лек автомобил с използване на МКЕ, Младежки Форум „Наука, Технологии, Иновации, Бизнес“ 2025 – есен, Пловдив, стр. 63-69, ISSN 2367-8569.С.

[10] Танева, К. Амбарев. Изследване Влиянието На Размерите На Вентилираните Отвори Върху Топлината Състояние На Спирачен Диск, Механика на машините, година XXXIV, бр. 135, книга 2, 2026, стр. 27-32, ISSN 0861-9727.

[11] Б. Казаков, С. Танева, К. Амбарев, Изследване на натоварванията на спирачен механизъм на лек автомобил, Младежки Форум „Наука, Технологии, Иновации, Бизнес“ 2025 – есен, Пловдив, стр. 70-75, ISSN 2367-8569.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

РАЗРАБОТВАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ТЕНЗОМЕТРИЧЕН МОНИТОРИНГ НА ДЕФОРМАЦИИ НА НОСЕЩ КОМПОНЕНТ НА ПОДЕМЕН МЕХАНИЗЪМ

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR STRAIN GAUGE MONITORING OF DEFORMATIONS IN A LOAD-BEARING COMPONENT OF A HOIST MECHANISM

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

Tihomir Atanasov
Technical University of Gabrovo

Emilian Hristov
Podemcrane AD, Gabrovo

Abstract
This paper presents the development of a Virtual Instrument in NI LabVIEW for real-time strain gauge monitoring of deformations in a load-bearing component of a hoist mechanism. The proposed system utilizes twelve independent analog inputs configured to capture linear strain signals from three-component rectangular strain gauge rosettes (00/450/900) connected in a quarter-bridge circuit across four selected critical points. The developed software architecture concurrently acquires raw data, provides real-time visualization, and performs continuous mathematical transformations based on the plane strain theory to compute the principal strains ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$) and their orientation angles (θ). All primary and processed results are systematically archived into a structured text file. A key novelty of this study is the integration of a direct measurement methodology executed without additional signal amplification. This hardware-software approach eliminates complex external amplifier stages, reduces system cost, and minimizes phase and frequency distortions while proving that high-resolution data acquisition can successfully replace expensive traditional strain gauge amplifiers in Structural Health Monitoring applications.

Keywords: Structural Health Monitoring, LabVIEW, Hoist Mechanism, Strain Gauge Rosette, Quarter-Bridge, Principal Strains, Direct Signal Acquisition.

ВЪВЕДЕНИЕ

Съвременните тенденции в развитието на подемно-транспортното машиностроене са насочени към оптимизиране на металните конструкции, чрез намаляване на собственото им тегло и намаляване на въглеродния им отпечатък по време на производствения им цикъл [1, 2]. Проектирането на съвременни телфери изисква прецизно познаване на напрегнато-деформираното състояние (НДС) на техните носещи компоненти. По време на експлоатация, тези конструкции са подложени освен на натоварвания обусловени от стандартните им цикли на работа, така и на комплексни, нестационарни и често непредсказуеми такива Те включват теглата на компонентите от които е изграден телфера, номиналния приложен

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

товар, динамични сили при ускорение и спиране на товара, както и усукващи моменти, породени от ексцентрично натоварване или геометрични несъвършенства. Продължителното излагане на подобни режими е предпоставка за появата на умора в материала, поява на микропукнатини и потенциален риск от аварии с тежки последствия. Поради това, разработването на надеждни системи за структурно наблюдение [3] и измерване на деформацията в реално време е важна задача за съвременната инженерна наука.

Основно предизвикателство при експерименталното измерване на деформации в носещи компоненти от конструкции на телфери е фактът, че посоките на главните напрежения в критичните зони (около заваръчни шевове, конзоли или места с концентрация на напрежения) са предварително много трудно определяеми. Прилагането на единични тензодатчици в такива условия е неефективно и може да доведе до сериозни грешки при експерименталното определяне на деформацията и оттам якостта. За преодоляване на този проблем, в настоящото изследване е възприет подход за многоосно тензометриране чрез използването на трикомпонентна правоъгълна розетка на деформациите (с разположение на сензорите под ъгли $0^0/45^0/90^0$). Изборът на този конкретен вид сензор се обосновава с няколко ключови инженерни предимства [4]:

✓ Пълно аналитично определяне на НДС: Правоъгълната геометрия позволява чрез измерване на три линейни деформации - ε_x, ε_y, ε_{xy} в една точка напълно да се дефинира равнинното деформирано състояние. Това дава възможност за аналитично определяне на главните деформации ε_1 и ε_2 и чрез тях главните напрежения σ_1 и σ_2 и ъгъла между тях θ.

✓ Технологична практичност: Правоъгълната розетка позволява лесно и прецизно ориентиране на базовия датчик -0^0 успоредно на надлъжната геометрична ос на носещият компонент, което значително улеснява физическия монтаж в реални условия и намалява субективната грешка при позиционирането.

Виртуалния инструмент е разработен посредством програмният продукт NI LabVIEW. Неговият избор е продиктуван от възможността за относително лесно програмиране на системата за тензометричен мониторинг чрез графичния език “G”. Това позволява на виртуалния инструмент да изпълнява едновременно и независимо трите основни процеса: непрекъснато измерване на входните сигнали, математическата им обработка (филтриране, превръщане на електрическия сигнал в натурални физични единици, изчисляване на главните деформации) и графична визуализация на получаваните резултатите на операторския интерфейс с минимално забавяне. Използван е принципът на измерване представен в [5, 6], които позволява получаване на данни без употребата на допълнителни инструментални усилватели на сигнал.

Хардуерната реализация е базирана на многофункционалната платка за събиране на данни NI USB-6351 X Series DAQ . Изборът на това устройство е обоснован със следните технически параметри, критични за изследването:

✓ Висока динамика и разделителна способност: Със своята 16-битова аналогово-цифрова конверсия и честота на дискретизация до 1.25MS/s, платката гарантира изключително висока точност и чувствителност при измерване на преходни динамични процеси, удари и високочестотни вибрации в носещия компонент.

✓ Технология NI-STC3: Тази технология осигурява усъвършенствано управление на времето и синхронизацията между отделните канали, което е критично за правоъгълната розетка, където сигналите от трите тензорезистора трябва да бъдат снети в абсолютно един и същ времеви момент.

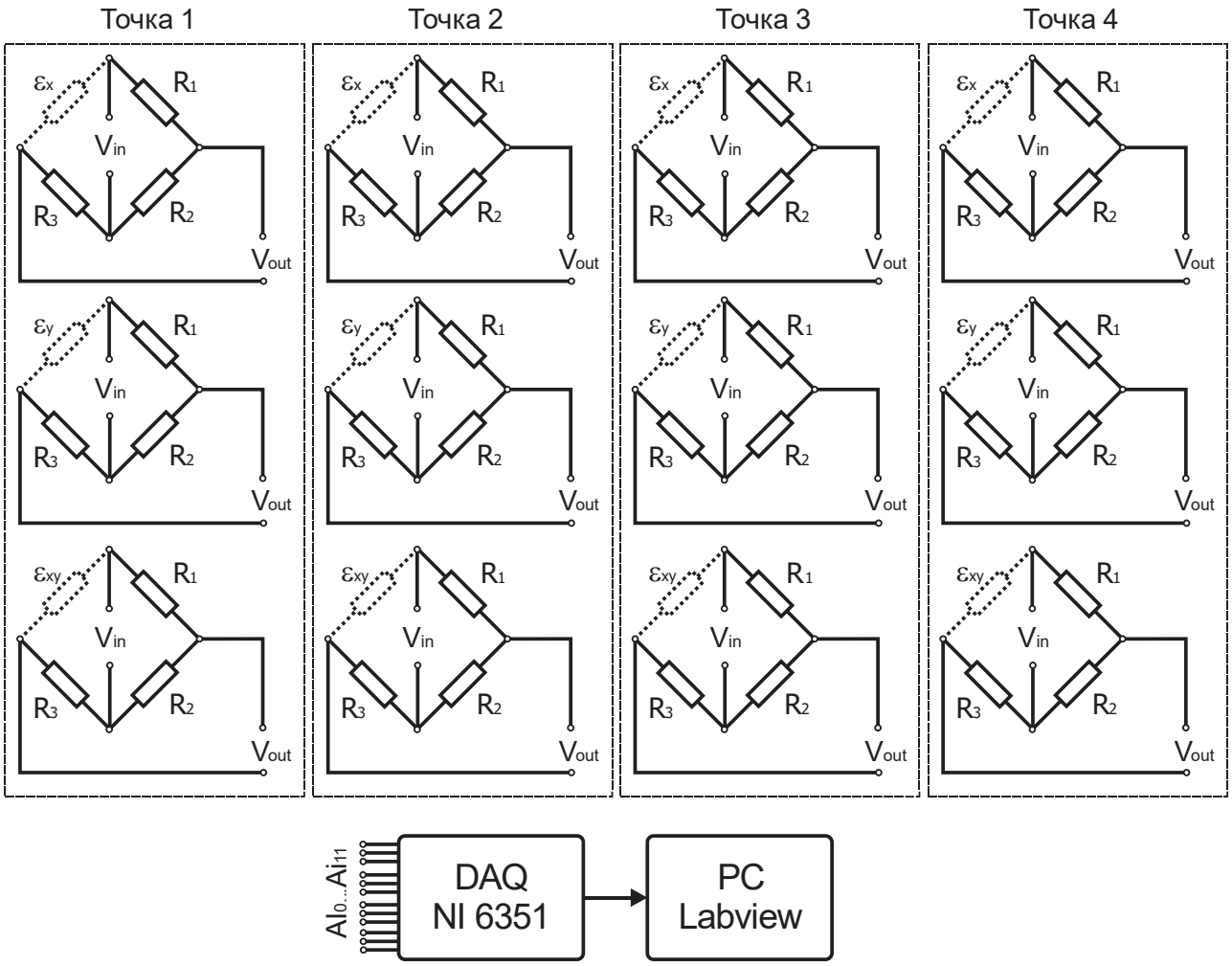
Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

✓ Надеждна драйверна интеграция: Използването на архитектурата NI-DAQmx позволява директна хардуерно-софтуерна връзка с LabVIEW, осигурявайки директен достъп до паметта и минимизирайки времето за закъснение при измерване на цялата система.

Целта на настоящата работа е да се създаде виртуален инструмент за определяне на деформациите в критични точки на носещ компонент от подемен механизъм.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Фиг. 1 представя блоковата схема, по която е реализиран процеса на измерване на деформации в четири критични точки от носещия компонент на телфера.



***Фиг. 1**. Блокова схема за измерване на деформации в 4 точки.*

За изследване на напрегнато-деформираното състояние (НДС) в избраните 4 критични точки от носещия компонент е разработена и приложена система за тензометрично измерване. Процесът на измерване и последващата обработка на данните протичат по следния алгоритъм:

Конфигурация на сензорите и измерване

Във всяка от четирите дефинирани критични точки са позиционирани по три независими тензорезистора, ориентирани по направленията на правоъгълна тензометрична розетка $0^0/45^0/90^0$. Всеки отделен сензор е свързан в електрическа схема „чет-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

върт-мост“. Тази конфигурация позволява прецизното улавяне на линейните деформации, предизвикани от външното натоварване. В резултат на измерването в реално време се получават три независими сигнала за компонентите на деформацията в локалната координатна система на точката:

ε_x, - линейна деформация по оста X (0^0);

ε_y - линейна деформация по оста Y(90^0);

ε_{xy} - деформация определена от тензодатчика на 45^0.

Математическа обработка и преход към равнинно деформирано състояние

Трите получени сигнала се подлагат на последваща аналитична обработка. Чрез фундаменталните формули от механиката на непрекъснатите среди за равнинно деформирано състояние се извършва трансформация на деформациите (1) и (2).

Първо се определя ъгловата деформация γ_{xy} чрез:

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy} + (\varepsilon_x - \varepsilon_y) \qquad (1).$$

Двете главни деформации се изчисляват чрез:

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_{x+\varepsilon_y}}{2} \mp \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_{xy})^2 + (\varepsilon_{xy} - \varepsilon_y)^2} \qquad (2).$$

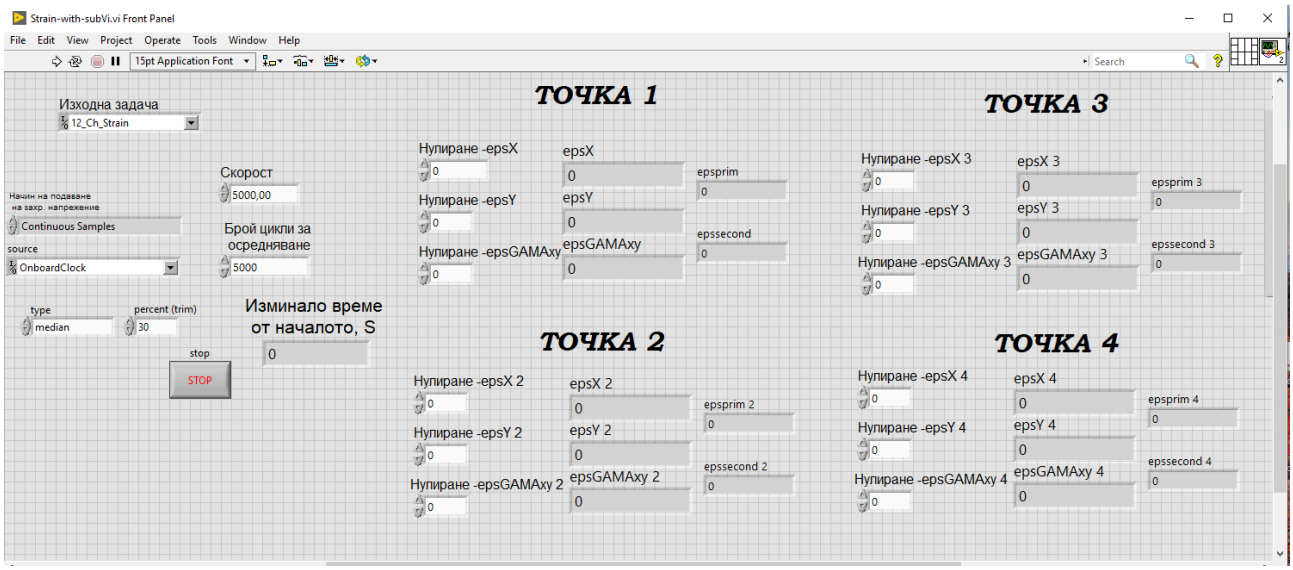
Ъгълът между главните направления, който определен спрямо първия тензодатчик, се намира чрез:

$$tg(2\theta) = \frac{2\varepsilon_{xy} - \varepsilon_x - \varepsilon_y}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \qquad (3).$$

Този изчислителен процес не е изолиран, а се изпълнява паралелно и непрекъснато във времето за всяка една от четирите избрани критични точки. По този начин системата осигурява пълна картина на динамичните изменения в НДС на целият компонент.

Виртуален инструмент

За реализиране на експерименталното изследване и автоматизираната обработка на данните е разработен специализиран виртуален инструмент в средата за графично програмиране NI LabVIEW. Инструментът притежава класическа двукомпонентна структура, състояща се от блокова диаграма, съдържаща програмния код и алгоритмите за обработка, и потребителски панел, изпълняващ ролята на потребителски интерфейс за управление и мониторинг.



***Фиг. 2**. Потребителски панел на виртуалния инструмент*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Работният процес, реализиран от виртуалния инструмент, протича в реално време и обхваща следните последователни фази:

1. Събиране на данни през аналоговите входове на DAQ платката NI USB 6351

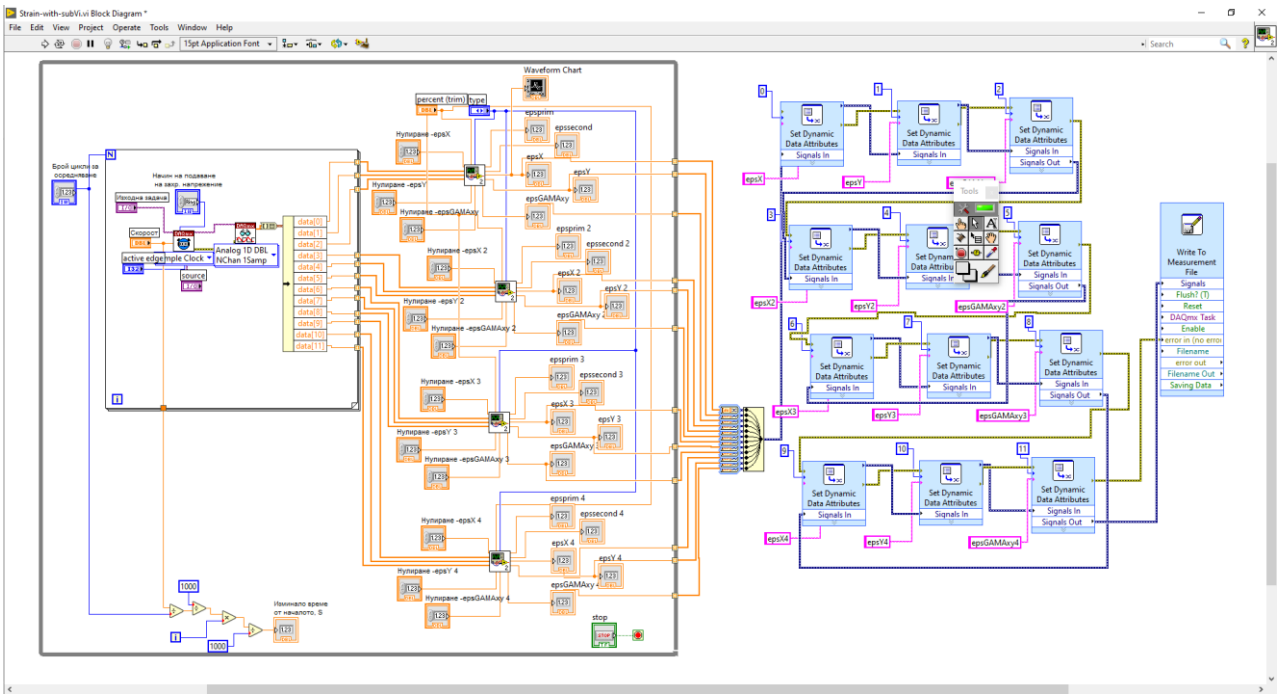
Системата започва работа с паралелно постъпване на сигнали през 12 независими аналогови входа на специализираната платка. Всеки от тези входове е софтуерно конфигуриран за директно измерване на сигнали от тензорезистори, свързани по схема „четвърт-мост“. Тъй като във всяка от 4-те дефинирани критични точки е монтирана по една трикомпонентна правоъгълна розетка, 12-те канала се разпределят по 3 за всяка точка, осигурявайки едновременното заснемане на линейните деформации.

2. Математическа обработка и трансформация на деформациите

Алгоритъмът трансформира трите компонента на деформацията от всяка розетка и изчислява: максималната главна деформация ε_1 за всяка точка, минималната главна деформация ε_2за всяка точка и ъгъла на главните направления θ спрямо геометричната ос на детайла.

3. Автоматизиран запис на данните

Виртуалния инструмент осигурява запис на постъпилите и изчислени данни, след завършване на процеса на структурен мониторинг.



***Фиг. 3**. Блокова диаграма на виртуалния инструмент*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В резултат на настоящата разработка е проектиран и реализиран виртуален инструмент в програмната среда NI Labview за много канално измерване на НДС в носещ компонент от подемен механизъм.

Разработената архитектура успешно интегрира едновременното измерване на сигнали постъпващи през 12 аналогови канала, тяхното математическо трансформиране в реално време до главни деформации за 4 точки.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Създаденият виртуален инструмент доказва, че разработената измервателна система притежава достатъчна динамика и ниско ниво на собствен шум, за да заменят скъпите традиционни тензометрични усилватели при статични и динамични изпитвания на подемни механизми.

Благодарности

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] Gao, Mengdi, Haihong Huang, Xinyu Li, and Zhifeng Liu. “Carbon emission analysis and reduction for stamping process chain.” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 91 , no. 1-4 (2017).

[2] Ingarao, Giuseppe, Giuseppina Ambrogio, Francesco Gagliardi, and Rosa Di Lorenzo. “A sustainability point of view on sheet metal forming operations: material wasting and energy consumption in incremental forming and stamping processes.” *Journal of Cleaner Production* 29-30 (2012).

[3] Jeroen Van Wittenberghe, Vitor Adriano, Okan Yilmaz, Filip Van Den Abeele,Increasing the Reliability of Industrial Overhead Cranes by Structural Health Monitoring, Procedia Structural Integrity,57, 2024, 95-103, ISSN 2452-3216,

[4] Mohd Diah, Muhammad Hafizi, Muhammad Haziq Faris Sahli Hazimin, Nur Athirah Syafiqah Noramli, and Herlina Abdul Rahim. 2025. “Strain Gauge Sensors in Industrial Instrumentation: A Review for Human Technology Integration ”. *Journal of Human Centered Technology* 4 (1):50-55.

[5] А. Анчев, Измерване на сила и деформация чрез пълен тензо мост без допълнително усилване на сигнала, Механика на машините. Варна 2009. Vol.86 (2009) p. 58-61.

[6] А. Анчев, Измерване на малки премествания чрез индукционен първичен преобразувател без допълнително усилване на сигнала, Известия на ТУ – Габрово, 38 (2009) стр.24-27.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

РОЛЯ НА ИЗКУСТВЕНИЯ ИНТЕЛЕКТ В ПРОЦЕСИТЕ ЗА АДИТИВНО ПРОИЗВОДСТВО

THE ROLE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN ADDITIVE MANUFACTURING PROCESSES

Hristian Mitev
[1]Department of Industrial Technology and Design, Technical University of Gabrovo
[2]*Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"*

Abstract
The purpose of this paper is to examine the fundamental role of artificial intelligence in optimizing processes in additive manufacturing. The analysis focuses on software architectures for pre-production simulation, closed-loop control systems during printing (In-Situ monitoring), and algorithms for managing the microstructural properties of materials. The synergy between AI and 3D printing lays the foundation for the next generation of autonomous factories capable of producing complex geometric structures with zero defects and maximum economic efficiency.

Keywords: artificial intelligence, additive technologies, 3D printing, rapid prototyping, machine learning;

ВЪВЕДЕНИЕ

След появата си в края на XX[ти] век адитивните технологии претърпяват развития в различни посоки [1]. Основните направления на развитие на технологиите за изграждане на детайли чрез добавяне на материал (additive technologies) са:

Размери на принтирания детайл – съвременните адитивни технологии могат да изграждат както все по-малки детайли (от няколко nm) така и обети, използвани за жилищни сгради;

Точност на изградените обекти;

Повишаване на разнообразието на материали, които могат да бъдат използвани;

В последните няколко години се наблюдават огромни инвестиции в адитивни технологии за производство на биологични тъкани.

Основната цел при създаването на адитивните технологии е осигуряване на възможност за бързо прототипиране (Rapid Prototyping) на детайли от пластмаса. В днешно време те имат фундаментална роля при развитието на Индустрия 4.0.

Адитивните технологии се използват за производството на елементи, възли и готови изделия във високотехнологични индустрии, като аеронавтика, биомедицина, автомобилостроене, производство на сложни полимерни изделия и др.

Разнообразието от материали, които се използват при адитивните производства са високотехнологични полимери, метални сплави, металокерамични материали а произведените изделия добиват все по-пълна функционалност, като необходимостта от допълнителни обработки на произведените детайли клони към нула.

При използване на адитивното произ-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

водство в масовото производство възникват следните предизвикателства:

- Наличие на допуски в размерите на детайлите;
- проблеми, възникнали от сложните термодинамични процеси, (особено при SLM технологията за изработване на метални изделия;
- възможност за поява на деформации, шупли и микроструктурни дефекти при пластмасовите и метални изделия;
- непълна стандартизация при процесите на за оптимизация.

Традиционните методи за оптимизация, разчитащи на класическите похвати са изключително скъпи, времеемки и неефективни. Параметрите, влияещи на качествата на принтираните изделия са многобройни, което усложнява оптимизационния процес. Възможностите на изкуствения интелект (ИИ) да изпълнява сложни функции и неговото лесно конфигуриране осигуряват широко поле за използването му. Интегрирането на алгоритми за машинно обучение (Machine Learning), компютърно зрение (Computer Vision) и внедряването им в системи от невронни мрежи дава възможност 3D принтиращите системи да бъдат високоточни, напълно функционални и управляеми в реално време.

Изкуственият интелект притежава способност да обработва огромни масиви от данни в реално време, да открива скрити взаимовръзки между входните и изходни параметри и да оптимизира процесите на нива, недостъпни за конвенционалния софтуер [1,2]. Нивото на развитие на ИИ дава възможност за неговото широко интегриране в голям спектър от индустриални системи.

ИЗЛОЖЕНИЕ

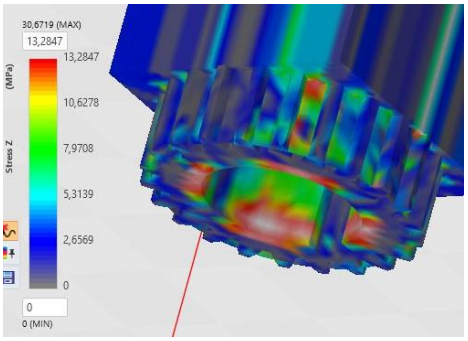
Оптимизацията на процесите в адитивните технологии чрез изкуствен интелект е следваща стъпка в развитието на софтуерните системи, която преобразува 3D принтирането от метод за бързо прототипиране в подход за индустриално масово производство. При оптимизацията на адитивните процеси, ИИ намира приложение в три основни етапа:

1. Преди произвеждането на детайл:

1.1 . Моделиране и симулации.

Един от основните проблеми при 3D принтирането (особено при технологиите за изработване на метални изделия - DMLS/SLM) са отклоненията от размера и деформациите, породени от термичните процеси, възникващи по време на синтероването на метален прах. Големите температурни промени, възникващи при процеса на лазерно синтероване са причина за вътрешни напрежения. Това води до риск от изкривяване, напукване, или отлепване от работната плоча. Интелигентни системи, базирани на изкуствен интелект се използват за виртуално моделиране на адитивните процеси.

Алгоритмите за машинно обучение симулират топлинното разпределение (в интервал от няколко милисекунди). На фиг. 1. е показана предварителна симулация на възникването на остатъчни напрежения в 3D принтиран детайл.



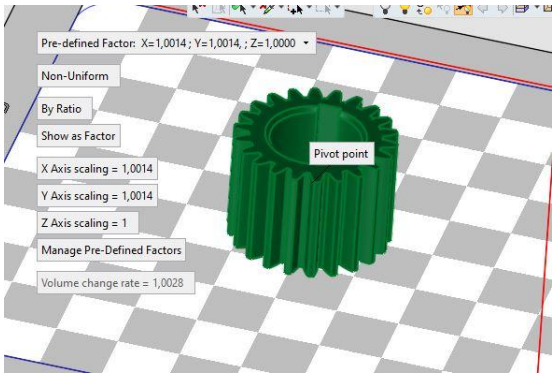
***Фиг. 1**. Симулация на възникването на остатъчни напрежения.*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

1.2. Предварителни корекции.

Опитите за установяване на оптималните условия за адитивно изграждане на конкретен обект отнемат време и средства. Възможно е с използването на ИИ да се предвиди точно къде и какви деформации ще възникнат в детайла. Това осигурява възможност да бъдат направени предварителни корекции в 3D модела [3].

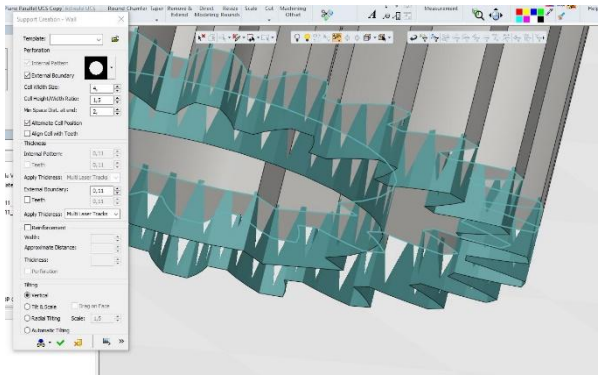
На фиг. 2 е представена софтуерна възможност за предварително задаване на корекции на геометрията на модела. По този начин с увеличаване, или намаляване на размерите в конкретни зони се постига високо ниво на съвпадение на изработеният детайл със зададените в модела геометрични параметри. Тъй като деформациите, които възникват в следствие на температурни промени в обема на изграждането изделие е налична и възможността за задаване на корекции по всяка една от осите (x, y и z). Използваният похват гарантира точност при изграждането на тела с произволна форма. Корекциите могат да бъдат задавани в милиметри до четвъртия знак след десетичната запетая.



***Фиг. 2**. Функция „Shrinkage compensation“.*

1.3. Оптимизация на ориентацията на детайла и поддържащите структури.

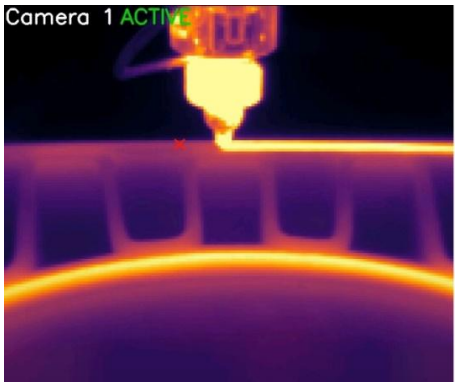
Системи, базирани на изкуствен интелект имат възможността да изчисляват оптималната позиция на детайла в работната зона за да се минимизира времето за работа и да се използват възможно най-малко поддържащи структури (supports). Фигура 3 показва един от вариантите за оптимизиране на поддържащите елементи.



***Фиг. 3**. Инструмент за генериране и оптимизация на поддържащи елементи.*

2. По време на печата (Real-Time Control).

Контролът с обратна връзка в реално време (In-Situ Monitoring) е все по-широко използван подход в съвременните адитивни технологии. Стандартните 3D принтери работят без обратна връзка, която да осигури информация в реално време за нивата на конкретни параметри на процеса. Обратна връзка в реално време може да се осигури чрез компютърно зрение (Computer Vision) и обработка на данните от ИИ (фиг. 4) [4]. По този начин се осигурява възможност за установяване на дефекти още при възникването им по време на изграждане на всеки слой.



***Фиг. 4**. Термално наблюдение в реално време [4].*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Висикоскоростни камери и температурни сензори се използват за заснемане на всеки следващ слой прах, или разтопен материал, като в голяма част от случаите се използват невронни мрежи. Система, базирана на НМ може да бъде „обучена“ на базата на голям брой цикли, извършени от 3D принтиращи системи и да бъде настроена да разпознава аномалии – неравномерно разстилане на металния прах при послойно изграждане, прегрявания в определена зона, или поява на шупли.

Възможностите на системите с изкуствен интелект за въвеждане на автоматични корекции (Closed-loop control) осигуряват възможност за бърза и прецизна реакция на системата и налагане на корекции в параметрите при 3D принтиране [5]. Такива могат да бъдат промени на мощността на лазерното лъчение, скоростта на сканиране, промяна на времето за разпределение на температурата, или прекратяване на работата при възникване на критичен проблем.

3. След приключване на процеса на 3D принтиране (качествен анализ и оптимизация на параметрите на процеса – Process Parameter Tuning).

Процесът на 3D принтиране зависи от голям брой променливи: скорост на лазерното сканиране, мощност на лазерното лъчение, дебелина на слоя, стратегия на сканиране (траектория на движение), температура на работната среда (Building chamber) и др.

Изключително трудоемко е да се открие оптималната комбинация от стойностите на всички променливи [2,5]. Използването на генетични алгоритми от системи, базирани на изкуствен интелект дава възможност за създаване на хиляди комбинации на параметри, за да бъде открита "оптималната точка", при която се постига максимална плътност на обекта, най-добро качество на повърхнините и най-висока скорост на производство.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интегрирането на изкуствения интелект в адитивните технологии отбелязва повратна точка в историята на съвременното производство. Интелигентни софтуерни системи се прилагат при решаване на проблемите, които в продължение на десетилетия са ограничавали възможностите на адитивните процеси до задачи на прототипирането [1,2,5].

В дългосрочен план интегрирането на системи с изкуствен интелект в адитивното производство поставя основата на напълно автономните производства (Lights-out manufacturing). Предстои навлизането на системи, при които ИИ не само ще се използва за оптимизиране на зададени процеси, а и за самостоятелно анализиране възможностите за използване на нови материали при адитивните производства [5].

Тенденциите в съвременната индустрия показват, че системи, базирани на изкуствен интелект ще направят адитивните технологии във високорентабилна част от Индустрия 4.0. Успешното развитие на тези иновационни подходи ще определя конкурентоспособността на производствения сектор през следващите десетилетия.

Благодарности

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

ЛИТЕРАТУРА

[1]Wenjie Liao, Xinzheng Lu, Yifan Fei, Yi Gu, Yuli Huang, Generative AI design for building structures, Automation in Construction, Volume 157, 2024, 105187, ISSN 0926-5805,

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105187.

[2] Mohit Srivastava, Junaid Aftab, Ladislav Tyll, The influence of artificial intelligence and additive manufacturing on sustainable manufacturing practices and their effect on performance, Sustainable Futures, Volume 10, 2025, 100820, ISSN 2666-1888, https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100820.

[3] Zoubeir, Adnane & Radi, Bouchaib. (2025). Intégration de l'Intelligence Artificielle dans la Fabrication Additive : Innovations et Tendances. Incertitudes et fiabilité des systèmes multiphysiques. 9. 17-23. 10.21494/ISTE.OP.2025.1325.

[4]https://3dprintingindustry.com/news/royal3ds-interlayer-control-system-targets-industrial-3d-print-quality-250119/ (достъпен на 04.05.2026 г.)

[5] Yourdkhani, M., Masoumipour, A., Ziaee, M. *et al.* Non-contact photothermal initiation of frontal polymerization during 3D printing of polymer composites. *npj Adv. Manuf.* **2**, 48 (2025). https://doi.org/10.1038/s44334-025-00062-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

ВЛИЯНИЕ НА ГЕОМЕТРИЧНАТА ОРИЕНТАЦИЯ НА ДЕТАЙЛА ВЪРХУ ВЪТЕШНИТЕ НАПРЕЖЕНИЯ, ВЪЗНИКВАЩИ ПРИ SLM ИЗГРАЖДАНЕ

INFLUENCE OF THE GEOMETRIC ORIENTATION OF THE PART ON THE INTERNAL STRESSES OCCURRING DURING SLM MANUFACTURING

Hristian Mitev
[1]Department of Industrial Technology and Design, Technical University of Gabrovo
[2]*Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"*

Abstract
In the additive manufacturing process using SLM technology, internal stresses arise, which can lead to unwanted changes in the geometry of the manufactured product and the risk of mechanical damage. The article discusses an approach to reducing internal stresses, comparing their values at different locations of the part in the work area. The results of the simulations show significant differences at different build positions..

Keywords: stress; SLM/DSLM, stress analys, simulation.

ВЪВЕДЕНИЕ

Един от най-разпространените и гъвкави процеси за адитивно производство на метални изделия е Selective Laser Melting (SLM), или Direct Metal Laser Sintering (DMLS). Процесът е означаван и с двата термина, основно в зависимост от географския район на приложението му – в ранните етапи на развитие „SLM“ е бил най-често използван в Европа, а „DMLS“ в САЩ [1].

По време на изграждането на детайли от метал посредством (SLM) технология възникват значителни вътрешни напрежения. Те се пораждат главно от високите температурни различия, които се получават при високоскоростното загряване и охлаждане на материала. Впоследствие тези процеси могат да доведат до възникването на остатъчни напрежения които могат да причинят деформации или механични дефекти, водещи до разрушаването на детайла .

Множество литературни източници описват редица подходи използвани за да се намалят напреженията, възникващи при SLM изграждане. В [2-4] са представени подходи за оптимизиране параметрите на процеса за изграждане на детайла – мощност на лазерното лъчение, скорост на сканиране, направление на сканирането и др.

Параметризирането на условията в работната зона на изграждане също има съществено влияние върху нивото и местата на възникване на вътрешните напрежения. [5,6].

Най-разпространеният подход за намаляване на остатъчните напрежения в детайли, произведени чрез SLM/DMLS тех-

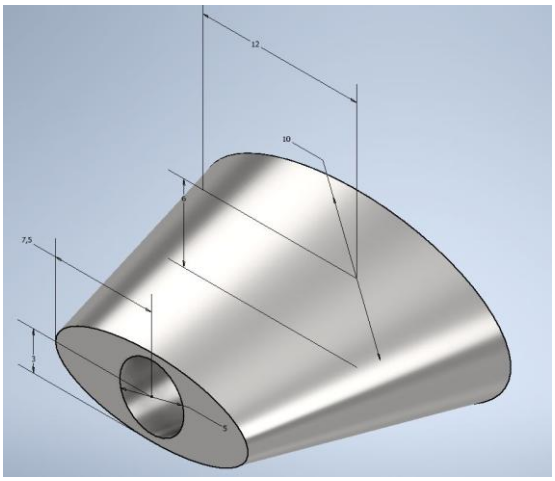
Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

нология е последващата им термообработка. Това решение е много просто, тъй като използва утвърдени технологии и не е насочено към специаспецифична модификация на самия SLM процес. Допълнителните обработки на детайла могат да увеличат времето за производство на готовото изделие и да повишат неговата себестойност [1].

ИЗЛОЖЕНИЕ

Един от лесните и сравнително бързи подходи за установяване нивата на вътрешните напрежения при SLM процесите е провеждането на симулации в CAD/CAE среда.

Детайл със сложни повърхнини е моделиран в CAD среда – AutoDeskInventor 2025 (фиг. 1).



***Фиг. 1**. 3D модел на детайла.*

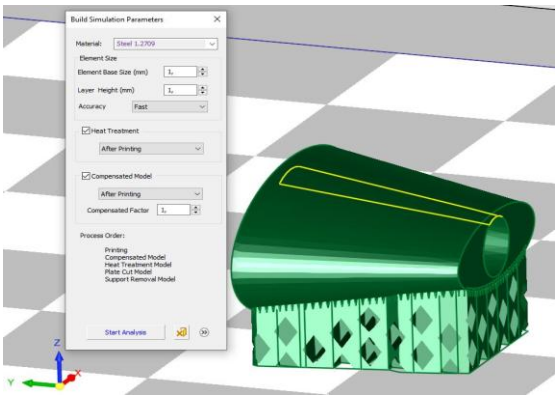
Проектираният детайл е импортиран в CAE среда на 3DXpert V15, който се използва както за разработване на адитивни технологични процеси, така и за провеждане на редица симулации, описващи SLM технологията.

Основен подход при проверка на нивата на вътрешните напрежения в проведеното изследване е влиянието на позицията на детайла в работната зона. Габаритите на детайла позволяват свободното му позициониране във всички възможни ориентации.

Проведени са шест симулации на процеса по изграждане, съответно с шест различни позиции на детайла.

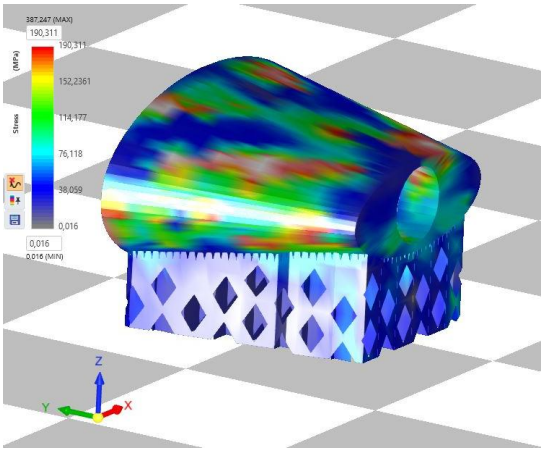
Всички симулации са проведени при еднакви стойности на изграждащите параметри. При всяка една симулация детайлът е разположен на 3mm. от изграждащата плоча, като са използвани еднакви по вид поддържащи елементи.

На фиг. 2 е представен детайла и менюто за начало на симулацията на изграждане на детайла.



***Фиг. 2**. Стартиране на симулацията по изграждане на детайла.*

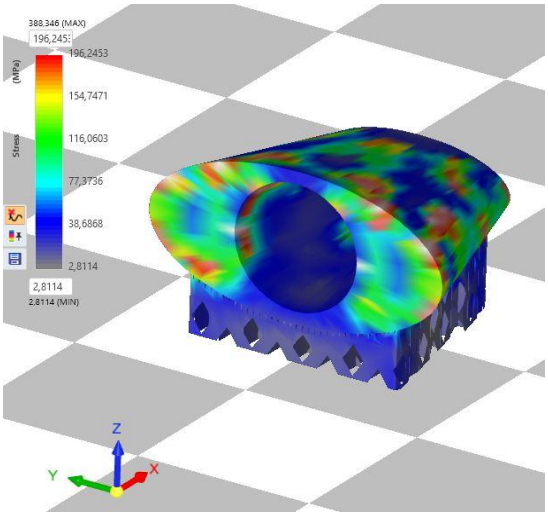
По време на първата симулация (S1) оста на отвора на детайла е успоредна с ос Y, а детайлът е разположен хоризонтално (фиг. 3). Максималната стойност на вътрешните напрежения е 387 MPa, като стойностите основно варират в раниците 38 ÷ 190 MPa.



***Фиг. 3**. Симулация S1.*

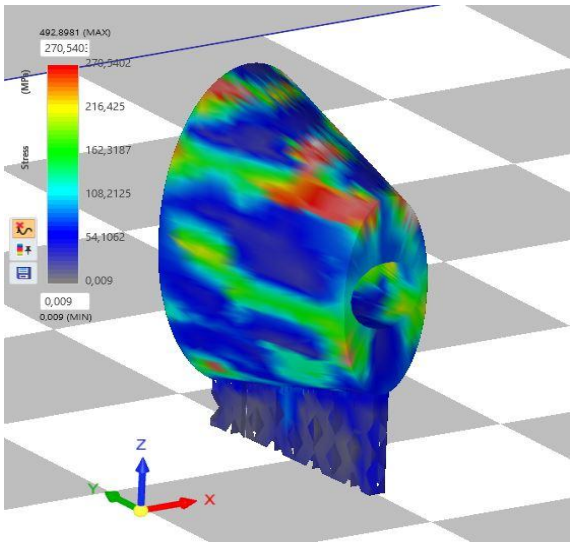
Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

По време на втората симулация (S2) оста на отвора на детайла е успоредна с ос X, а детайлът е разположен хоризонтално (фиг. 4). Максималната стойност на вътрешните напрежения е 388 MPa, като стойностите основно варират в раниците 38 ÷ 196 MPa.



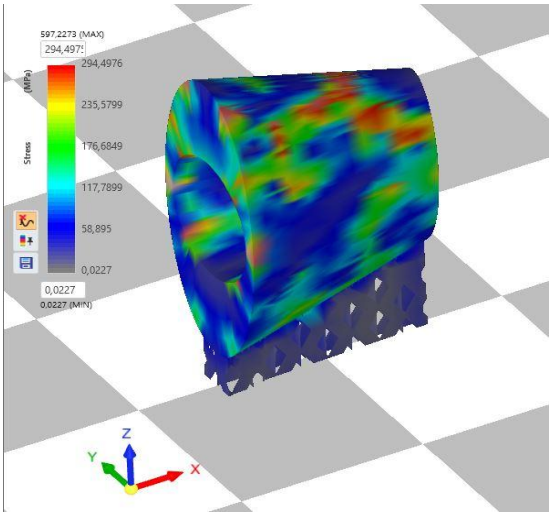
***Фиг. 4**. Симулация S2.*

По време на третата симулация (S3) оста на отвора на детайла е успоредна с ос Y, а детайлът е разположен вертикално (фиг. 5). Максималната стойност на вътрешните напрежения е 492 MPa, като стойностите основно варират в раниците 54 ÷ 270 MPa.



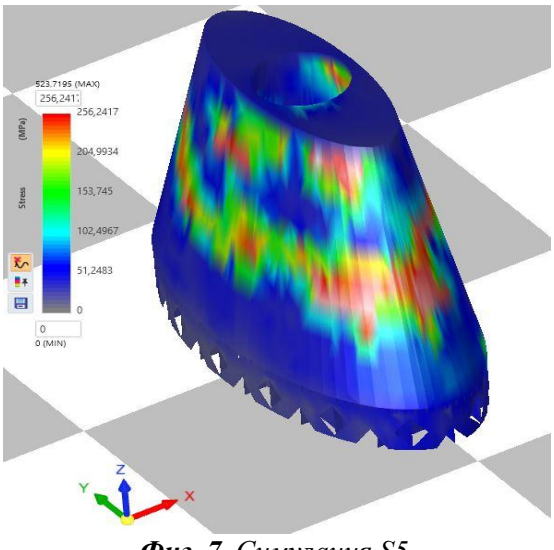
***Фиг. 5**. Симулация S3.*

По време на четвъртата симулация (S4) оста на отвора на детайла е успоредна с ос X, а детайлът е разположен вертикално (фиг. 6). Максималната стойност на вътрешните напрежения е 597 MPa, като стойностите основно варират в раниците 58 ÷ 294 MPa.



***Фиг. 6**. Симулация S4.*

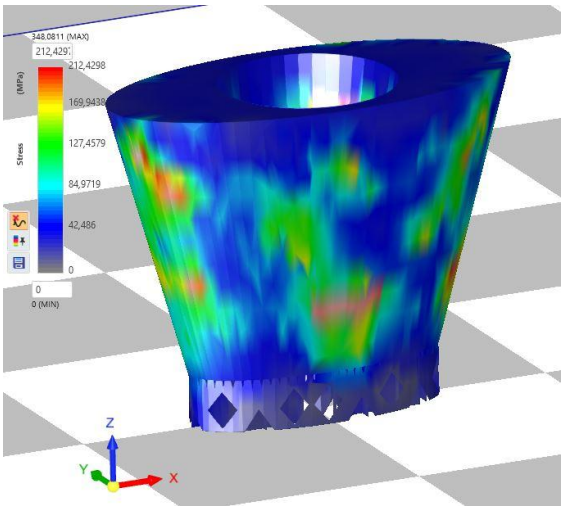
По време на петата симулация (S5) оста на отвора на детайла е успоредна с ос Z, а конусната повърхнина е изправена (фиг. 7). Максималната стойност на вътрешните напрежения е 523 MPa, като стойностите основно варират в раниците 51 ÷ 256 MPa.



***Фиг. 7**. Симулация S5.*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

По време на шестата симулация (S6) оста на отвора на детайла е успоредна с ос Z, а конусната повърхнина е обърната (фиг. 8). Максималната стойност на вътрешните напрежения е 348 MPa, като стойностите основно варират в раниците 42 ÷ 212 MPa.



***Фиг. 8**. Симулация S6.*

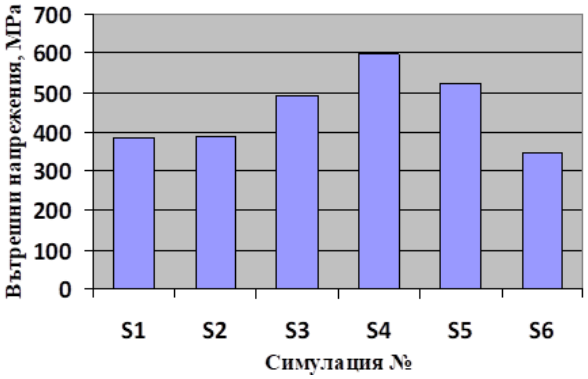
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получените резултати, от проведените симулации са представени в табл. 1.

Табл. 1.

Симулация	Максимална стойност на вътрешните напрежения (MPa)
S1	387
S2	388
S3	492
S4	597
S5	523
S6	348

Данните за максималните стойности на вътрешните напрежения от проведените симулации са представени графично на фиг. 9. Забелязват се почти идентични стойности на вътрешните напрежения при провеждането на S1 и S2. Това се дължи на факта, че разположението на детайла е хоризонтално, а разликата в ориентацията на оста на отвора съответно по осите X и Y не указва съществено влияние.



***Фиг. 7**. Графика на максималните стойности на вътрешните напрежения.*

При сравняването на стойностите на вътрешните напрежения се забелязват високите нива, отчетени при симулации S3, S4 и S5.

При S3 и S4 детайлът е ориентиран вертикално, броят на изграждащите слоеве е голям, а контактната повърхнина с изграждащата основа е малка, което обуславя тези високи стойности.

При S5 оста на отвора на детайла е вертикална, а конусната повърхнина е изправена. Долната част на детайла има по-голям обем, от следващите по-горни слоеве, което влияе по негативен начин за топлообмена с основата и е причина за големите нива на вътрешните напрежения при тази конфигурация.

При S6 конусната повърхнина е обърната, което променя начинът на топлообмен с основата на детайла.

Резултатите от симулациите S1 и S2 показват сравнително ниски нива на вътрешни напрежения. Голямата контактна площ с изграждащата плоча и сравнително малката височина на детайла осигуряват добрите нива на вътрешни напрежения. Тъй като височината на детайла и при двете симулации е най-ниска, то времето за неговото изработване ще бъде най-малко.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] Patterson, A.E.; Messimer, S.L.; Farrington, P.A. Overhanging Features and the SLM/DMLS Residual Stresses Problem: Review and Future Research Need. Technologies 2017, 5, 15. https://doi.org/10.3390/technologies5020015.

[2] Abe, F.; Osakada, K.; Shiomi, M.; Uematsu, K.; Matsumoto, M. The Manufacturing of Hard Tooling from Metallic Powders by Selective Laser Melting. J. Mater. Process. Technol. 2001, 111, 210–213.

[3] Qian, Bo.; Shi, Y.; Wei, Q.; Wang, H. The helix scan strategy applied to the selective laser melting. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2012, 63, 631–640.

[4] Mumtaz, K.A.; Hopkinson, N. Selective Laser Melting of thin walled parts using pulse shaping. J. Mater. Process. Technol. 2010, 210, 279–287.

[5] Mertens, R.; Vrancken, B.; Holmstock, N.; Kinds, Y.; Kruth, J.-P.; van Humbeeck, J. Influence of powder bed preheating on microstructure and mechanical properties of H13 tool steel SLM parts. Phys. Procedia 2016, 83, 882–890.

[6] Buchbinder, D.; Meiners, W.; Pirch, N.; Wissenbach, K.; Schrage, J. Investigation on reducing distortion by preheating during manufacture of aluminum components using selective laser melting. J. Laser Appl. 2014, 26, 012004.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА ПАРАМЕТЪРА НА ГРАПАВОСТТА RA НА ОБРАБОТЕНАТА ПОВЪРХНИНА НА МЕСИНГ CUZN39PB3 , ПОЛУЧЕНА ЧРЕЗ ПОВЪРХНОСТНА ПЛАСТИЧНА ДЕФОРМАЦИЯ С ДЕФОРМИРАЩИ ЕЛЕМЕНТИ ОТ ДИАМАНТ И FERRO-TIC „C“

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RA ROUGHNESS PARAMETER OF THE MACHINED SURFACE OF CUZN39PB3 BRASS, OBTAINED BY SURFACE PLASTIC DEFORMATION USING DIAMOND AND FERRO-TIC “C” DEFORMING ELEMENTS

Kalin Anastasov
Technical University of Gabrovo, BG

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

Abstract

This article presents a comparative analysis of the surface roughness of specimens made of the two-phase brass alloy CuZn39Pb3 and subjected to surface plastic deformation using diamond and Ferro-Tic “C” deformation elements. For both types of deformation elements, contact with the machined surface occurs via the mechanism of sliding friction. The experiment was conducted under identical conditions—lubrication with abundant cooling, identical geometry, and identical operating parameters (cutting speed Vb, feed rate fb, and variable deformation force Fb). The workpieces were pre-machined by turning under optimal conditions to ensure minimal initial roughness.

Keywords: *Two-phase brass CuZn39Pb3, Surface characteristics, Plastic deformation, Diamond, Ferro-Tic "C", Deformation elements .*

ВЪВЕДЕНИЕ

Повърхностните слоеве на металните конструктивни и машинни елементи са най-натоварените участъци от външни въздействия [1]. Те са подложени на механични, термични, химични и физични влияния (включително физически полета) и най-често на комбинации от тях. Някои от тези ефекти (напр. корозия) остават активни дори в периоди, когато върху металния компонент не се прилага работно натоварване. В зависимост от приложените влияния, в повърхностните слоеве могат да възникнат явления като дифузия, корозия, хетерогенна катализа, адхезия и адсорбция, автономно или чрез взаимна зависимост. Локализираните повреди, дължащи се на умора, износване и корозия на повърхностните слоеве, нарушават нормалното взаимодействие между компонентите, причинявайки задиране, заклинване, удари и вибрации. Следователно, експлоатационните условия, продължителността на живота и надеждността на техническите устройства зависят в най-голяма степен от състоянието на повърхнините.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

За модифициране на повърхностните слоеве се прилагат различни видове процеси - промяна на химичния състав чрез модификация, базирана на дифузия (термохимична дифузия), като например цементация, нитриране или цианидиране, модификация чрез добавяне на нов материал, под формата на покритие или тънък филм, за да се създаде бариера между покрития слой и околната среда, модификация без промяна на химичния състав на материала. Последното направление се основава на два основни подхода – повърхностна термична обработка и повърхностна студена обработка – и комбинация от тях. Най-евтината и най-ефективна е повърхностната студена обработка, която е насочена към пластично деформиране на повърхността и съседните подповърхностни слоеве на металните компоненти при температура по-ниска от тази на рекристализация. Методите, използвани в този подход, могат да бъдат разделени на динамични и статични. Съвременните динамични методи включват например дробеструйно обработване, лазерно обработване, кавитационно ударно обработване с водна струя, повърхностна механична обработка с триене и ударно полиране. При статичните методи (методи на полиране) твърд и гладък деформиращ елемент се притиска непрекъснато и с постоянна сила към обработваната повърхност, движейки се спрямо нея в тангенциална посока. Тангенциалният контакт между деформиращия елемент и обработваната повърхност може да бъде триене при търкаляне или триене при плъзгане. В първия случай деформиращият елемент е топка или ролка (цилиндрична, бъчвовидна или тороидална), като методите са съответно топково полиране или ролково полиране (RB). Във втория случай (плъзгащ контакт) методът се нарича плъзгащо полиране (SB). Работната повърхност на деформиращия елемент при SB е най-често сферична, по-рядко цилиндрична или тороидална. Материалът на деформиращия елемент е или твърда сплав, естествен диамант, или изкуствен диамант [1,2,3].

Чрез методите на повърхностната пластична деформация могат да бъдат повишени характеристиките на повърхностните слоеве на почти всички метали и сплави (черни и цветни).

Съдържащият олово CuZn39Pb3 двуфазен месинг е една от най-широко използваните сплави в много промишлени сектори поради комбинацията от свойства: отлична обработваемост, пластичност (α-фазата е пластична), устойчивост на органични вещества и алкални съединения, устойчивост на износване при плъзгане и добри механични свойства поради наличието на алуминий, който усъвършенства структурата. Месинговата сплав с олово CuZn39Pb3 се характеризира със 100% индекс на обработваемост, чрез рязане и тези процеси са широко изследвани. Въпреки, че този тип месинг е с влошена обработваемост, чрез методите на ППД, поради наличието на β фаза, има изследвания показващи, че този тип обработки дават обещаваща насока за подобряване на целостта на повърхността на тази сплав, чрез прилагане на статичната повърхностна студена обработка [4]. Има проведени изследвания за обработване, чрез SB процеси с деформиращи елементи от диамант и от Ferro – Tic “C”.

Целта на статията е сравнителен анализ на грапавостта на обработената повърхност на пробни тела от CuZn39Pb3, получена чрез SB процеси, който са реализирани с помощта на деформиращи елементи, изработени от диамант и от Ferro – Tic “C”, при променливи радиус на деформиращия елемент r и сила на деформиране F_B.

ИЗЛОЖЕНИЕ

1. Материали и методи

1.1 Материал

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

За нуждите на експеримента е използван горещовалцован прътов материал от CuZn39Pb3 с диаметър 23 mm без допълнителна термична обработка. Химичният състав в тегловни % е представен в таблица 1. За изследване на химичния състав на материала е използван спектрометър *BELEG LAB 3000s*.

***Табл. 1**. Химичен състав на месинг CuZn39Pb3*

Zn	Sn	Si	Mn	Pb	Fe	P	Cu
33.41	0.13	0.02	0.03	3.23	0.2	0.06	62.87

Основните механични свойства са:

- якост на опън - 411 MPa;
- удължение - 6,85%;
- ударна жилавост - 14J / см2;
- твърдост по Бринел - 138 HB;
- граница на провлачване от 295 MPa;

1.2 Машина, инструменти и приспособления

Експериментите са проведени на струго-фрезови център с ЦПУ, марка *“РАЙС“, мод. Т2500,* представен на фигура 1.

***Фиг. 1**. Струго-фрезови център с ЦПУ, марка* “РАЙС“, мод. Т2500

Приспособленията използвани при експериментите са:

- Въртящ център;
- Патронник хидравличен;
- Зъбен център;

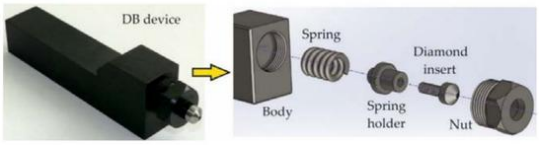
Режещи инструменти използвани при експеримента:

На база на обработваемия материал с неговия вид и физико-механични характеристики, е прието обработката на опитните образци да се извърши с металокерамични сменяеми пластини *VCMT 160404-F3P* на фирма ISCAR, установени в призматичен държач *SVVCN 2525M-16*, като са осигурени следните геометрични параметри:

- главен установъчен ъгъл $\kappa_p = 72{,}5^o$;
- спомагателен установъчен ъгъл ; $\kappa_p' = 72{,}5^o$;
- главен заден ъгъл $\alpha_0 = 7^o$:
- радиус при върха на инструмента r_ϵ = 0,4mm.

Инструменти за осъществяване на процеса на ППД (SB):

За осъществяване на процеса на ППД по метода Slide Burniching (SB) е използван специализиран държач, адаптиран за захващане към ножодържача на металорежещата машина. Деформиращия елемент е подвижен, като в задния му край има пружинен елемент, служещ за регулиране силата на деформацията F_B. общ вид и устройството на приспособлението е представен на фигура 2.



***Фиг. 2**. Устройство за осъществяване на процеса SB*

На фигура 3 са представени комплект сменяеми деформационни елементи, изработени от Ferro – Tic “C”.

***Фиг.3**. Комплект сменяеми деформационни елементи, изработени от Ferro – Tic “C”*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

1.3 Лабораторно оборудване за изследване на обработените образци

За изследване грапавостта на обработената повърхнина след струговане и ППД е използван използван грапавомер „*Mitutoyo*”.

1.4 План на експеримента

За изследване влиянието на вида на деформиращия елемент на деформиращия елемент върху грапавостта на обработената повърхнина са проведени еднофакторни експерименти, при следните постоянни елементи на режима на рязане при струговане:

- Скорост на рязане $V_C = 50, m/min;$
- Подаване $f = 0,05, mm/rev$;
- Дълбочина на рязане $a_p = 1, mm$;

Процесът на ППД е проведен при следните постоянни параметри:

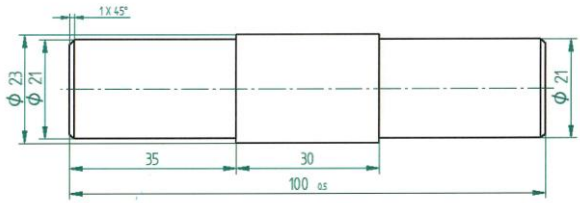
- Скорост на деформация $V_B = 70, m/min;$
- Подаване $f_B = 0,05, mm/rev;$

Променливите параметри при ППД са:

- Сила на деформиране $F_B = 50N, 100N, 150N, 200N, 250N, 300N, 350N, 400N;$
- радиус на деформиращия елемент: $r = 3mm, 4mm , 5mm;$

Експеримента е проведен в условията на прилагане на МОТ на водна основа и за процеса на струговане и за този на ППД.

Схема на пробното тяло с форма и размери е представена на фигура 4, а на фигура 5 и 6 са представени опитните постановки при струговане и ППД, в работни условия.



***Фиг.4**. Форма и размери на пробните тела*

***Фиг. 5**. Опитна постановка за процеса на струговане*

***Фиг. 6**. Опитна постановка за процеса на ППД*

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ И КОМЕНТАРИ

След стругованието пробните на пробните тела е измерена средна грапавост Ra = 0.558μm, като най-голямата стойност е Ra = 0.633μm, а най-малката Ra = 0,480μm.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Измерените средни стойности на параметъра Ra, след проведените експерименти са систематизирани в таблици 2 – 4.

Табл.2. *Стойност на параметъра Ra, при r=3mm, на деформиращия елемент*

Пробно тяло	ccc	Измерена грапавост след ППД с диамантен деформиращ елемент	Измерена грапавост след ППД с деформиращ елемент от Ferro-Tic “C’’
1	50	0.083	0.440
2	100	0.053	0.434
3	150	0.064	0.246
4	200	0.067	1.076
5	250	0.071	1.097
6	300	0.063	1.380
7	350	0.235	1.510
8	400	0.438	1.594

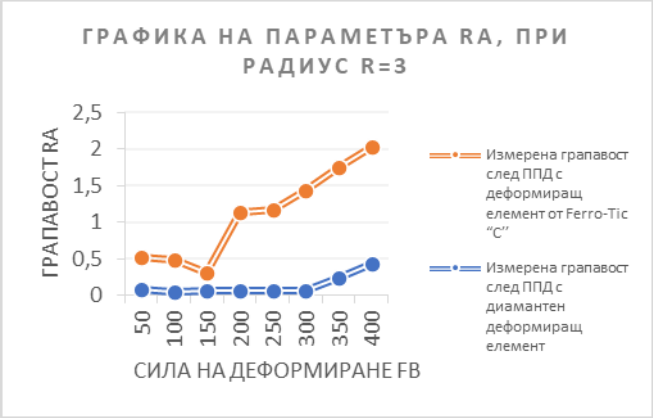
Табл.3. *Стойност на параметъра Ra, при r=4mm, на деформиращия елемент*

Пробно тяло	Сила на деформиране	Измерена грапавост след ППД с диамантен деформиращ елемент	Измерена грапавост след ППД с деформиращ елемент от Ferro-Tic “C’’
1	50	0.092	0.161
2	100	0.083	0.311
3	150	0.074	0.307
4	200	0.092	0.238
5	250	0.095	0.221
6	300	0.085	0.221
7	350	0.095	0.352
8	400	0.112	0.507

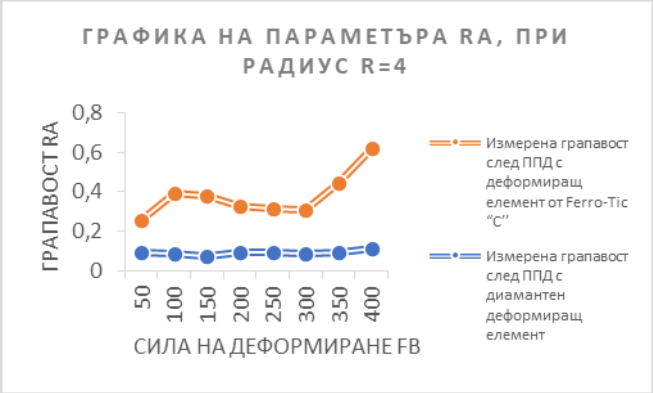
Табл.4 *Стойност на параметъра Ra, при r=5mm, на деформиращия елемент*

Пробно тяло	Сила на деформиране	Измерена грапавост след ППД с диамантен деформиращ елемент	Измерена грапавост след ППД с деформиращ елемент от Ferro-Tic “C’’
1	50	0.411	0.170
2	100	0.425	0.211
3	150	0.385	0.244
4	200	0.435	0.205
5	250	0.505	0.296
6	300	0.395	0.389
7	350	0.211	0.332
8	400	0.343	0.258

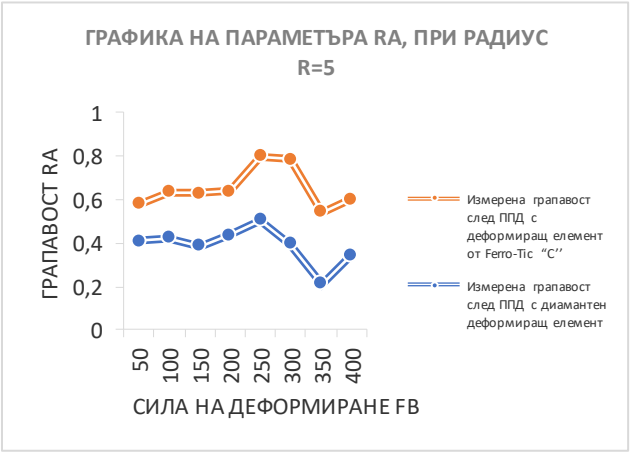
Графики измерените стойности на параметъра *Ra*, са представени на фигури 7 – 9.



Фиг. 7*. Графика на Ra, при r = 3mm, на деформиращия елемент*



Фиг. 8*. Графика на Ra, при r = 4mm, на деформиращия елемент*



Фиг. 9*. Графика на Ra, при r = 5mm, на деформиращия елемент*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено експериментално изследване на 2-D параметъра *Ra,* от повърхностната текстура, след ППД (*Slide burnishing)* процес, на заготовки от месинг *CuZn39Pb3*, в състояние на повърхнината - след струговане, без предварителна термична обработка - отгряване и използване на деформационни елементи изработени от диамант и *Ferro -Tic "C"*. Експериментите са проведени с деформиращи елементи с различна геометрия (радиуси), при различни нива на силата на деформиране F_B.

Резултатите показват, че параметрите радиус на деформиращия елемент *r* и силата на деформиране F_B, оказват значително влияние върху грапавостта на обработената повърхнина. Наблюдава се, че при всички комбинации от променливи фактори, повърхнините обработени с инструменти от *Ferro -Tic "C",* са с по високи показатели на наблюдаваният параметър, респективно с по-ниско качество. При r = 3 и 4mm моделът на процеса е много различен и се наблюдава, че с увеличаване на деформационната сила (над 150N, r = 3 mm и 300N при r = 4 mm), крайната грапавост, надхвърля, като стойност изходната. С увеличаване на радиуса на деформиращия елемент, влиянието на деформационната сила намалява. Това основно може да бъде обяснено с коефициента на триене между деформационния елемент и заготовката. При радиус на елементите r = 5 mm, се наблюдава сходство в получените модели на грапавостта.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] Duncheva G, Surface integrity prez prizmata na surface engineering. Universitetsko izdatelstvo, "Vasil Aprilov", Gabrovo, 2023, ISBN: 978-954-683-691-5.

[2] Astankhov V.P. (2010) Surface Integrity – Definition and Inportance in Functional Performance (Ed.,J. Paulo), Surface Integrity in Mashining, Springer – Verlag London Limited, e-ISBN 978-1-84-882-974-2.

[3]] J. Maximov and G. Duncheva, "The correlation between surface integrity and operating behaviour of slide burnished components—A review and prospects," *Applied Sciences,* vol. 13, no. 5, p. 3313, 2023. https://doi.org/10.3390/app13053313

[4] Duncheva, G.V.; Maximov, J.T.; Anchev, A.P.; Dunchev, V.P.; Argirov, Y.B.; Kandeva-Ivanova, M. Enhancement of the wear resistance of CuAl9Fe4 sliding bearing bushings via diamond burnishing. *Wear* **2022**, *510–511*, 204491.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

КЛАСИФИКАЦИЯ И СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА СЕНЗОРИТЕ ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ТЕМПЕРАТУРА

CLASSIFICATION AND COMPARATIVE ANALYSIS OF TEMPERATURE MEASUREMENT SENSORS

Iliyan Gospodinov[1,2], Dimitar Dichev[1,2], Iliya Zhelezarov[1,3], Tsanko Karadzhov[1,2]
[1]*Department of Machine and Precision Engineering, Technical University of Gabrovo*
[2]*Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"*
[3]*National Center of Excellence Mechatronics and Clean Technologies*

Abstract
Temperature is one of the most frequently measured quantities across all modern industries; consequently, measurement technology offers a wide variety of temperature sensors designed based on different physical principles. Despite their common purpose, they differ from one another in terms of parameters such as accuracy, sensitivity, measurement range, application area, and others. The purpose of this article is to classify the main types of temperature sensors according to their key characteristics. A comparative analysis of the key parameters of the temperature sensors discussed has been performed. The conclusions drawn can assist in selecting an appropriate temperature sensor when addressing a specific measurement task.

Keywords: temperature measurement, sensor classification, temperature sensors, resistance temperature detectors, contact sensors, non-contact sensors, thermocouples

ВЪВЕДЕНИЕ

Температурата е една от най-важните физични величини, характеризиращи състоянието на веществата и протичащите процеси. Тя оказва съществено влияние върху механичните, електрическите, химичните и биологичните свойства на материалите. Поради тази причина измерването на температурата намира широко приложение в промишлеността, енергетиката, транспорта, медицината, научните изследвания и системите за автоматизация [1].

Температурният сензор представлява първичен измервателен преобразувател, осъществяващ преобразуване на топлинната величина температура в електрически сигнал, функционално свързан с измервана-та величина., съдържащ информация за стойността на измерваната величина. Полученият сигнал може да бъде използван за визуализация, запис, предаване на големи разстояния или автоматично управление на технологични процеси [2].

Специфичните изисквания при измерването на температурата в различните технологични процеси са довели до съществуването на множество сензори и уреди за измерване на температура базирани на различни физични принципи. Въпреки общата си цел, те се различават помежду си като конструкция, точност, чувствителност, бързодействие, диапазон на измерване, област на приложение и др. Наличието на голямо разнообразие от сензори за измерване на

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

температура позволява избор на подходящ сензор за всяка отделна измервателна задача и същевременно затруднява този избор [3]. Ето защо, създаването на класификация на сензорите за измерване на температура е съществено важно за сравняване на различните технологии и подпомагане на обоснования избор на измервателен елемент [4].

ИЗЛОЖЕНИЕ

Основни характеристики на сензорите за измерване на температура

Независимо от начина на измерване всички температурни сензори имат общ набор от метрологични характеристики които позволяват сравнението между различните технологични решения.

Точност

Една от най-важните характеристики на всеки сензор е неговата точност. Тя характеризира съответствието между измерената и действителната стойност на величината. Точността влияе пряко върху качеството на измерването и често е определящият фактор за избора на конкретен сензор [5].

Чувствителност

Изменението на изходният сигнал на сензора при промяна на температурата определя чувствителността на сензора.

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta T} \qquad (1)$$

където:

S – чувствителност;

ΔY – изменение на изходния сигнал;

ΔT – изменение на температурата.

Избора на чувствителност на сензора се определя от конкретната измервателна задача, високата чувствителност на сензора позволява регистрирането на много малки изменения в измерваната температура.

Бързодействие

Бързодействието се определя от скоростта с която изходният сигнал на температурният сензор реагира на изменението на температурата. Обикновено бързодействието се определя от времеконстантата на сензора. Бързодействието на сензора е важен фактор при измерване на температура на бързо-променящи се процеси.

Линейност

Линейността показва доколко зависимостта на изходният сигнал от измерваната температура е линейна функция. При линейните температурни сензори единица изменение на температурата предизвиква единица изменение на изходният сигнал. Изходните резултати от измерването с линейни температурни сензори са лесни за обработка тъй като не се налага извършването на сложни математически обработки [6].

Повторяемост

Това е показател за устойчивост на измервателният процес на случайни въздействия. Повторяемостта показва възможността на температурният сензор да възпроизведе един и същи изходен сигнал при многократни измервания. Сензорите с висока повторяемост възпроизвеждат близки по стойност резултати при многократни измервания. Повторяемостта е показател за надеждността на съответният сензор.

Стабилност

Стабилността е параметър който показва запазването на метрологичните характеристики на сензора във времето. По време на своята работа сензора е изложен на различни външни въздействия които могат да предизвикат стареене на материалите от които е изработен и тяхното механично износване. Подобни изменения могат да доведат до съществени отклонения в точността на сензора. Сензорите с висока стабилност могат да запазват своите параметри за дълъг

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

период на експлоатация.

Температурен диапазон

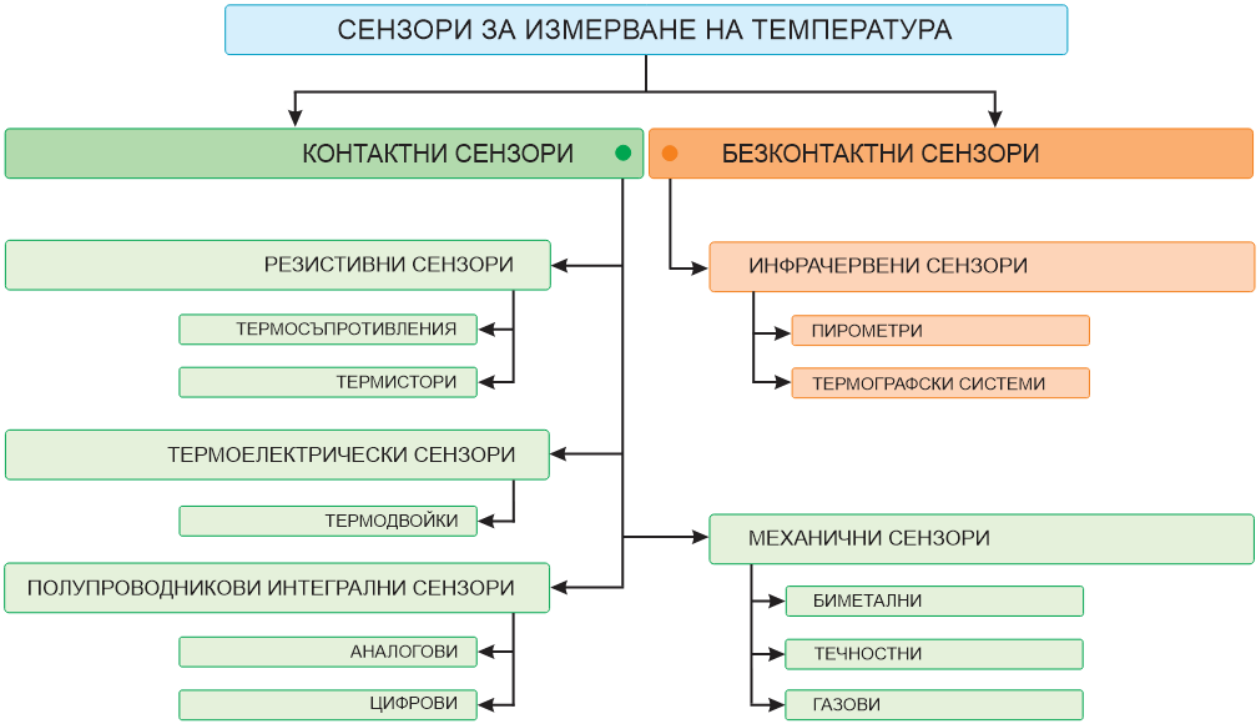
Диапазонът на измерване се определя от минималната и максималната температура, които могат да бъдат измерени от даден сензор. Докато всички разгледани дотук характеристики се явяват качествени и метрологични характеристики, то диапазонът на измерване на сензора определя границите на неговата приложимост. При избора на температурен сензор за решаване на конкретна измервателна задача следва да се знаят очакваните работни температури и на тази база да бъде избран сензор чийто измервателен диапазон ги покрива напълно.

Класификация на температурните сензори.

Класификацията на температурните сензори може да бъде извършена по много показатели. Според принципа им на действие, според вида на изходният сигнал, според начина на получаване на измервателната информация и др.

Според начина на получаване на измервателната информацията, температурните сензори се делят на две основни групи, контактни и безконтактни.

При контактните сензори, чувствителният елемент контактува пряко с обекта на измерване и измерваната температура е пряк топлообмен между тях до достигане на топлинно равновесие.



***Фиг. 1**. Класификация на сензорите за измерване на температура.*

При безконтактните сензори измерването се извършва чрез регистрация и анализ на информация излъчвана от обекта на измерване без да се осъществява физически контакт между тях.

Контактни температурни сензори

- **Резистивни температурни**

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

сензори
- Термосъпротивления
- Термистори

➢ **Термоелектрически температурни сензори**
- Термодвойки

➢ **Полупроводникови температурни сензори**
- Аналогови
- Цифрови

Безконтактни температурни сензори
➢ Пирометри
➢ Термографски системи

Резистивни температурни сензори

Резистивните температурни сензори са едни от най-разпространените, те определят температурата чрез измерване на промяната на електрическото съпротивление на чувствителния елемент. Тези сензори се характеризират с висока точност, добра повторяемост на резултатите и относително проста технологична реализация. В зависимост от материала от който е изработен чувствителният елемент биват метални и полупроводникови темристори [7].

***Фиг. 2**. Термосъпротивление - pt100*

Термистори

Термисторите са полупроводникови елементи чието електрическо съпротивление се променя силно в зависимост от температурата. В зависимост от начина по който се променя съпротивлението термисторите могат да бъдат PTC /Positive Temperature Coefficient/ и NTC /Negative Temperature Coefficient/. При PTC сензорите електрическото съпротивление нараства с нарастване на температурата. При NTC сензорите електрическото съпротивление намалява с увеличаването на температурата.

Термисторите притежават много висока чувствителност, малки размери и са лесни за производство.

***Фиг. 3**. NTC сензор.*

Основният им недостатък е силната нелинейна зависимост на съпротивлението от температурата.

Термоелектрически температурни сензори

Термодвойки

Термоелектрическите температурни сензори известни още като Термодвойки измерват температурата чрез използване на термоелектричния ефект на Зеебек. Термодвойката е изработена от 2 различни метала които са свързани в един общ край. При нагряване на общия край в двата свободни края възниква ЕДН -електродвижещо напрежение. Стойността на това напрежение зависи от температурата. Термодвойките се отличават с широк температурен ди-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

апазон на приложение, малка времеконстанта и сравнително ниска производствена себестойност, но имат ниска чувствителност.

***Фиг. 4**. Термодвойка тип К.*

Полупроводникови температурни сензори

Аналогови интегрални температурни сензори

Аналоговите интегрални температурни сензори използват промяната в параметрите на полупроводников елемент в зависимост от температурата. Изходният сигнал обикновено е ток или напрежение, чиято стойност е пропорционална на измерваната температура. Този тип сензори са с много малки физически размери и имат добра линейност. Поради интегралния си характер те намират широко приложение в електрониката. Основен недостатък е силно ограниченият температурен диапазон в който могат да бъдат използвани.

***Фиг. 5**. Аналогов интегрален температурен сензор – LM35*

Цифрови интегрални температурни сензори

Цифровите интегрални температурни сензори представляват интегрална схема в която освен чувствителен елемент са реализирани и други схеми за преобразуване и първична обработка на измервания сигнал. Изходният сигнал при цифровите сензори представлява цифрово представяне на измерената температура. Цифровите интегрални сензори имат добра точност и висока устойчивост на външни смущения, но ограниченият температурен диапазон в който могат да бъдат използвани е съществен недостатък.

Фиг. 6. Цифров интегрален температурен сензор - DS18B20.

Безконтактни температурни сензори

Този вид сензори не осъществяват контакт с измерваният обект. Те използват инфрачервеното електромагнитно излъчване от обекта на измерване. Чрез измерване на интензитета на това излъчване и спектралната му характеристика може да се съди за неговата температура. Изходният сигнал обикновено е напрежение по стойността на което се съди за температурата.

Голямото предимство на този вид сензори е, че те се използват за измерване на температурата на труднодостъпни или силно нагрети обекти. Измерването с такъв

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

сензор не влияе на измерваният обект тъй като не се осъществява физически контакт между средството за измерване и обекта на измерване.

Имат добра точност и бързодействие, но са много чувствителни на външни въздействия [8].

Пирометри

Пирометрите представляват безконтактни средства за измерване на температура, които определят температурата на даден обект чрез анализ на неговото топлинно (инфрачервено) излъчване. За разлика от контактните температурни сензори, при пирометрите не се осъществява физически контакт с измервания обект, което позволява измерване на температурата на движещи се, труднодостъпни или силно нагрети повърхности. Принципът на действие на пирометрите се основава на факта, че всяко тяло с температура над абсолютната нула излъчва електромагнитна енергия в инфрачервения диапазон. Интензитетът и спектралният състав на това излъчване зависят от температурата на обекта. Пирометърът регистрира инфрачервеното излъчване чрез оптична система и чувствителен инфрачервен детектор, след което електронен блок обработва сигнала и изчислява съответната температура. Основните предимства на пирометрите са високото бързодействие, липсата на влияние върху измервания обект, възможността за измерване от голямо разстояние и приложимостта им при много високи температури.

Фиг. 7. Ръчен инфрачервен пирометър.

Термографски системи

Термографските системи използват матрица от инфрачервени сензори за едновременно измерване на температурата на множество точки от един обект на измерване. Резултатът от измерването е термограма в която температурата се изобразява в цветова гама.

Фиг. 8. Термографска система

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Таблица 1. Сравнителен анализ между основните температурни сензори

Характеристика	Термодвойка	RTD (Pt100 или Pt1000)	NTC Термистор
Принцип на действие	Термоелектричен ефект	Изменение на съпротивлението на метал	Изменение на съпротивлението на
Температурен диапазон	-200°C до +1800°C	-200°C до +850°C	-50°C до +300°C
Точност	Средна	Много висока	Висока
Линейност	Ниска	Много добра	Нелинейна
Чувствителност	Ниска	Средна	Много висока
Време за реакция	Бързо	Средно	Много бързо
Необходимост от захранване	Не	Да	Да
Цена	Ниска	Средна до висока	Ниска
Стабилност	Добра	Много висока	Добра
Типични приложения	Пещи, турбини, металургия	Прецизни промишлени измервания	Електроника, медицина, битова техника

Таблица 1 представя сравнителен анализ на трите най-широко използвани технологии за измерване на температура – термодвойки, термосъпротивления (RTD) и NTC термистори. Сравнението е извършено по основни метрологични и експлоатационни характеристики, включително принцип на действие, температурен диапазон, точност, линейност, чувствителност, време за реакция, необходимост от захранване, цена, стабилност и типични области на приложение.

От представените данни се вижда, че термодвойките осигуряват най-широк температурен диапазон на измерване – от около -200°C до +1800°C, което ги прави особено подходящи за високотемпературни промишлени процеси, металургия и енергетика. Техните основни предимства са широкият диапазон на измерване, високото бързодействие и липсата на необходимост от външно захранване.

Термосъпротивленията от типа RTD (Pt100 и Pt1000) се отличават с най-висока точност, отлична стабилност и добра линейност на функцията на преобразуване. Поради тези характеристики те намират широко приложение в прецизни промишлени измервания, лабораторни изследвания и калибриращи системи.

NTC термисторите се характеризират с много висока чувствителност и кратко време за реакция, което ги прави подходящи за измерване на малки температурни изменения и за приложения в електрониката, медицинската техника и битовите устройства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Извършеният сравнителен анализ показва, че не съществува универсален температурен сензор, който да осигурява оптимални стойности на всички метрологични и експлоатационни показатели едновременно. Всеки от разгледаните типове сензори притежава специфични предимства и ограничения, обусловени от използвания физичен принцип на преобразуване. Поради това изборът на температурен сензор следва да се извършва въз основа на комплексна оценка на изискванията към точността, чувствителността, бързодействието, температурния диапазон и условията на експлоатация. Различните сензори обладават различни характеристики наред с представените предимства, всеки сензор има и специфични недостатъци, от където следва, че изборът на температурен сензор за решаване на специфична измервателна задача следва да се извършва в непосредствена взаимо-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

свързаност с условията поставени от самата измервателна задача.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] Steinhart, J. S., & Hart, S. R. (1968, August). Calibration curves for thermistors. In *Deep sea research and oceanographic abstracts* (Vol. 15, No. 4, pp. 497-503). Elsevier.

[2] Webster, J. G., & Eren, H. (Eds.). (2014). *Measurement, instrumentation, and sensors handbook: Spatial, mechanical, thermal, and radiation measurement* (2nd ed.). CRC Press.

[3] Fraden, J. (2004). *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. New York, NY: Springer New York.

[4] Кирий, А. И., & Асенов, А. Н. (2006). *Измерване на топлинни, хидравлични и механични величини*. Технически университет – София.

[5] Doebelin, E. O., & Manik, D. N. (2007). *Measurement systems: application and design.*

[6] Bentley, J. P. (2005). *Principles of measurement systems* (4th ed.). Pearson Education.

[7] Childs, P. R. N. (2001). *Practical temperature measurement*. Butterworth-Heinemann.

[8] Michalski, L., Eckersdorf, K., Kucharski, J., & McGhee, J. (2001). Temperature measurement (2nd ed.). John Wiley & Sons. ISBN 0-471-86779-9.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

АДИТИВЕН ТЕХНОЛОГИЧЕН ПРОЦЕС ЗА ИЗРАБОТВАНЕ НА ДЕТАЙЛ „ВЛОЖКА“

ADDITIVE MANUFACTURING PROCESS FOR PRODUCING AN "INSERT" PART

Hristian Mitev[1,2] **Kalin Anastasov[1,2]**

[1]*Department of Industrial Technology and Design, Technical University of Gabrovo*
[2]*Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"*

Abstract
This article describes an additive manufacturing process for producing an "Insert" component with complex conformal cooling channels. It outlines the advantages of conformal cooling channels and the challenges involved in manufacturing the component. The manufacturing process has been implemented in real production..

Keywords: 3D metal printing; additive technologies; conformal cooling channels; CAD/CAE system.

ВЪВЕДЕНИЕ

Продължителността на цикъла на инжекционното формоване на полимери, зависи главно времето за запълването на работната кухина и кристализацията на пластмасата. Времето за охлаждане или втвърдяване е основният фактор, определящ общата продължителност на цикъла. Времето за охлаждане съставлява между 50% и 70% от общото време, в зависимост от размера и изискванията към качеството на повърхностната структура. За да се съкрати продължителността на цикъла, са разработени много различни методи и техники [1]. Развитието обхваща както хардуера, така и софтуера за продуктивно, предсказуемо и икономично създаване на форми. В хардуерната част, освен правите охлаждащи канали, са разработени различни методи като спираловидни канали, система с прегради и отвори, както и система със топлинни тръби за равномерно и ефективно охлаждане на детайла [2].

Конвенционалните охлаждащи канали се изработват по прави линии. Този метод дава неравномерни резултати, тъй като конвенционалното охлаждане не може да осигури надеждно охлаждане в цялата кухина на матрицата. Неравномерното охлаждане на детайлите води до удължаване на цикъла, неравномерно охлаждане, изкривяване и бракуване. Конформните охлаждащи канали (КОК) се очертават като потенциална алтернатива, която набира все по-голяма популярност [3].

Конформното охлаждане използва специално профилирани канали за течност, които следват точното очертание на матрицата, като осигурява до 50% по-кратко време на цикъла и значително по-добра

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

температурна равномерност в сравнение с конвенционалното охлаждане, което разчита на твърди, праволинейни тръби.

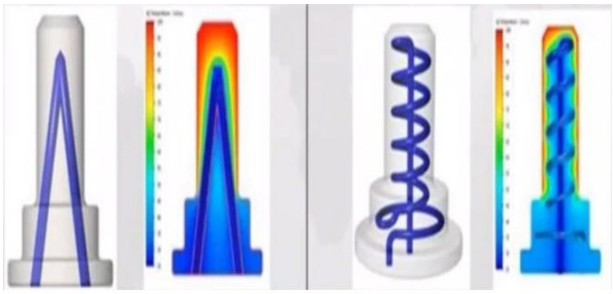
Основното предимство на КОК е, че намаляват времето за охлаждане и осигуряват равномерно охлаждане. Системите, използващи КОК са се доказали като по-ефективни, в сравнение с конвенционалните охлаждащи канали по отношение на производствената скорост и точността на формованите детайли.

Процесът на адитивно производство, разработен през 90-те години на миналия век, даде ново измерение на разработването на вградени охлаждащи канали, които се приспособяват към повърхността на матрицата. Развитието на изчислителни инструменти за анализ в края на 70-те години даде нова насока за оптимизиране на конструкцията на охлаждащите канали с цел преодоляване на проблеми, свързани с качеството, като остатъчно напрежение, изкривяване и свиване, с цел подобряване на здравината и производителността [1].

Както бе споменато по-горе, се полагат редица усилия за подобряване на охлаждането на матриците, но всички разгледани системи са трудни за изработване поради ограниченията на традиционните инструменти. Появата на системите за адитивно производство предложи на проектантите на матрици нов начин за решаване на проблемите, свързани с проектирането на охладителните системи. Типичните процеси на адитивно производство включват моделиране чрез напластяване, селективно лазерно синтероване, стереолитография, производство на ламинирани обекти и 3D печат и др. [1].

Възможността за изработване на 3D елементи с почти неограничена сложност направи тези процеси значими за производството на сложни охлаждащи канали във вътрешността на матриците като начин за постигане равномерност при темперирането [5]. Този тип охлаждащи канали са изработени така, че да следват контурите на матрицата, поради което се наричат конформни охлаждащи канали. Sachs и др. [6] представят напредъка в конформното охлаждане, контрола на размерите, повърхностната обработка и твърдостта при директно 3D печатани метални инструменти.

На фигура 1 са представени методи за конвенционално темпериране на вложка (a) и конформно темпериране (b).



***Фиг. 1**. Охлаждащи системи от конвеционален (a) и конформен тип (b).*

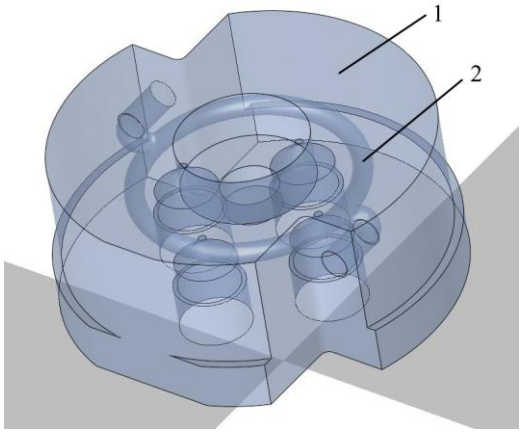
При използване на темпериращa система от конвенционален тип се наблюдават големи разлики в температурата на работните повърхнини на представения инструмент. Това може да доведе до редица дефекти, породени от неравномерно изстиване на пластмасовото изделие, което ще бъде произведено. При използване на темпериращa система с конформни канали се постига много по-равномерно темпериране на инструмента, което води до увеличаването на качеството на произведеното изделие, както и до значително намаляване на времето за неговото производство.

ИЗЛОЖЕНИЕ

В статията е разгледан технологичен процес за изработването на заготовка за детайл – вложка, проектирана със сложна темпериращa система, базирана на конформни канали. Геометрията на тези кана-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

ли е сложна и следва геометрията на работните повърхнини на детайла (фиг. 2.).



***Фиг. 2**. Детайл „Вложка“ с конформни охладителни канали.*

Детайлът „вложка“ се състои от тяло (1) и темперираща система с конформна структура (2). Целта на описаната темперираща система е да се осигури равномерно разпределение на температурата по време на изстиване на пластмасовото изделие.

Материалът, от който ще бъде изработен детайлът – вложка е мартензитна неръждаема стомана – 17-4 PH. Тя е широко приета в голям брой индустрии. 17-7 PH предоставя много полезното съчетание от висока якост и твърдост, отлична устойчивост на корозия и лесна термична обработка [7].

Химическият състав на стомана 17-4PH е представен в табл. 1 [7].

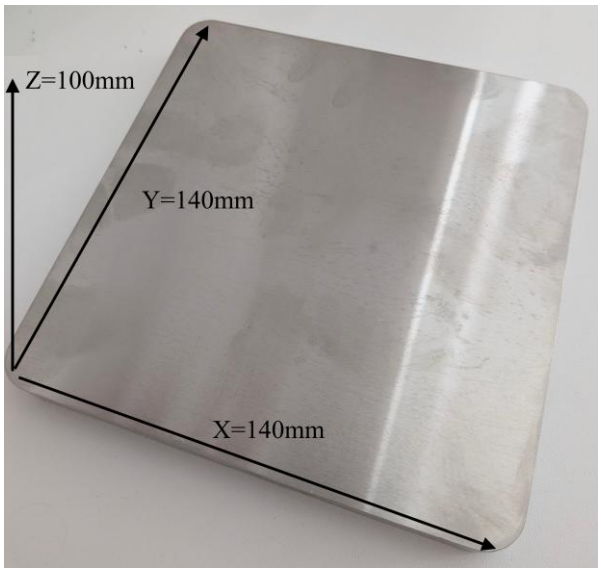
Табл. 1. Хим. състав на стомана 17-4PH.

Хим. елемент	Процентно съдържание
C	0.07 max.
Mn	1.00 max.
P	0.04 max.
S	0.03 max.
Si	1.00 max.
Cr	5.00 – 17.50
Ni	3.00 – 5.00
Cu	3.00 – 5.00
Nb	0.15 – 0.45

Технологията, която е използвана за производството на детайла е DMLS (Direct Metal Laser Sintering). При нея лазерен лъч разтопява слой метален прах.

Прахът за адитивно производство може да се получава по няколко различни начина. Производственият процес зависи от материала на праха и неговото крайно качество. Газовата атомизация, VIM газовата атомизация, плазмената атомизация, газовата атомизация чрез разтопяване на електрод и хидридно-дехидридните методи са най-често използваните за производството на метален прах, като нито един от тези методи не осигурява 100% ефективност [4].

Детайлът ще бъде изработен на 3D принтер за метални изделия ProX DMP200. Принтерът разполага с работна зона от 140 x 140 x 100мм., съответно по осите x, y, и z (фиг. 3).



***Фиг. 3**. Детайл „Вложка“ с конформни охладителни канали.*

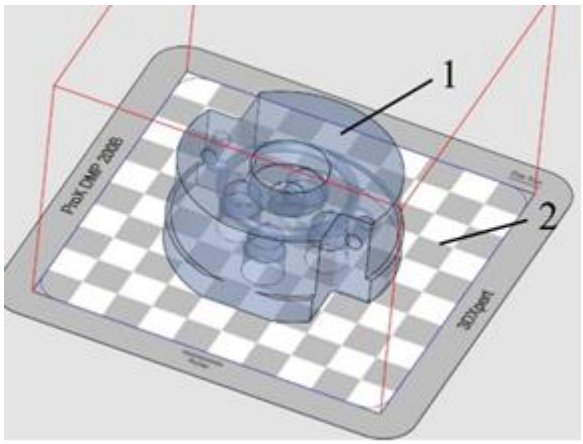
Технологичните му възможности напълно покриват изискванията, за изработването на конкретния детайл. На фигура 4 е представена снимка на 3D принтер за метал ProX DMP200.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

***Фиг. 4**. 3D принтер за метал ProX DMP200.*

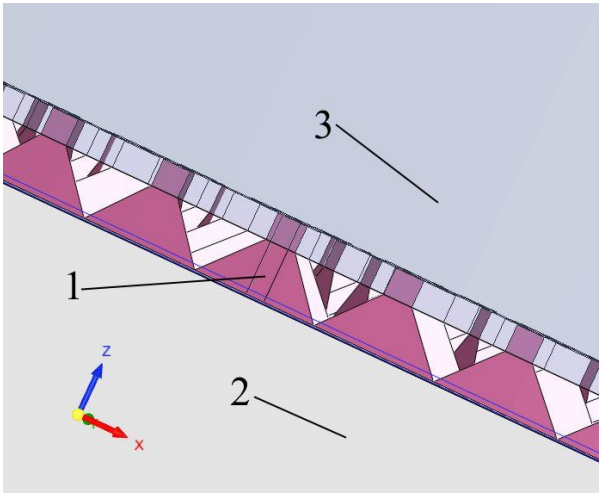
Технологичният процес за изработването на детайла се моделира в CAD/CAE/CAM среда – 3DXpert 15. Тя представлява високотехнологична виртуална среда за разработване на проекти за 3D печат, симулации и анализи на процеса.

Моделът на детайл „Вложка“ (1) е импортиран в софтуерния продукт и е разположен върху плочата за изграждане на детайли (2). (фиг5).



***Фиг. 5**. Модел на детайл „Вложка“.*

С цел осигуряване на правилно изграждане и безопасно демонтиране детайлът е разположен на 0.5мм. над изграждащата плоча. Специализирани поддържащи елементи (supports) са генерирани, с цел осигуряване на сигурна и едновременно лесна за премахване връзка между детайла и мястото, върху което ще бъде изграден. (фиг. 6)



***Фиг. 6**. Поддържащи елементи (supports).*

Поддържащите елементи (1) са автоматично генерирани, и осъществяват връзката между изграждащата плоча (2) и детайла (3). Структурата им позволява излишния метален прах да бъде отделен веднага след приключване на процеса по принтиране и да бъде използван отново.

За да се постигнат по-ниски нива на якост и твърдост режимите, по които ще се синтероват поддържащите елементи са със значително по-ниска енергийна плътност.

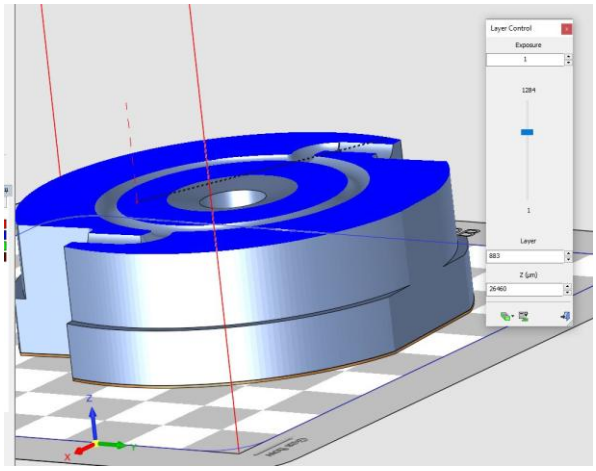
В [8] Дунчева и Максимов изследват режимите за изработване на ротационни детайли от стомана 17-4 PH, чрез адитивна технология, базирана на лазерно синтероване на метален прах (LPBF). Оптималната стойност на енергийната плътност, която е установена е E = 52.083 J/mm^3. Постигната е чрез задаване стойност на мощността на лазерното лъчение P = 150W; скорост

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

на сканирането V = 1200 mm/s; и дебелина на слоя метален прах от 40µm.

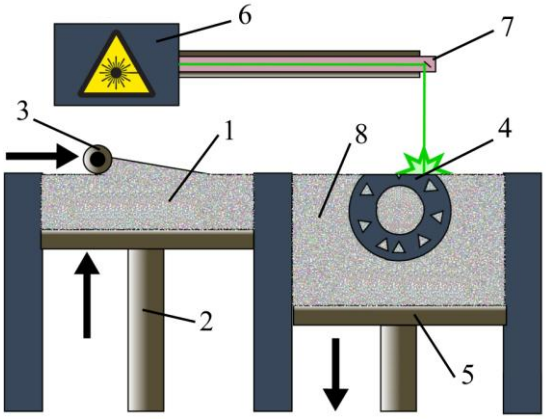
С оглед на данните от изследването в [8] са приети следните режими на работа: мощност на лазерното лъчение P = 150 W; скорост на сканиране V = 1200 mm/s; дебелина на слоя t = 40 µm.

След софтуерна обработка, в която детайлът е разделен на слоеве с дебелина от 40µm. (фиг. 7) е преминато към генериране на управляващ 3D принтера файл.



Фиг. 7*. Послойно изграждане на детайла.*

На фиг. 8 е показана последователността от действия при послойно изграждане [9].



Фиг. 8*. Послойно изграждане на детайла* [9].

Използваният 3D принтер за метални изделия ProX DMP200 има следната последователност от действия при послойното изграждане [9]:Зареденият метален прах (1) се подава посредством буталото за подаване на метален прах (2). Нанасянето на конкретен слой от метален прах се извършва от ролер (3), който при движението си надясно разстила металния прах в зоната за синтероване върху изграждащият се детайл (4). Движението на буталото на детайла (5) осигурява точното позициониране на детайла и определя дебелината на изграждащият слой. Лазерен източник (6) излъчва лазерно лъчение, което се отклонява от сложна галванометрична система (7), осигуряваща точното позициониране и скоростта на сканираната повърхност. По време на работа на машината зоната около детайла се запълва с излишен прах (8), който след приключване на адитивното изграждане се пресява за да се отстранят нежелани частици, възникнали при синтерованието и се използва отново при следващо зареждане на 3D принтера.

За да се гарантира пълното и точно разстилане на слой метален прах буталото (2) подава три пъти повече метален прах. Това означава, че ако детайлът, който ще бъде изграден има височина от 10mm., то необходимият за изграждането му метален прах трябва да е поне 30mm.

Подготовката на 3D принтера за метал се състои от няколко стъпки:

1. Монтиране на изграждаща плоча.
2. Зареждане на необходимото количество метален прах.

Количеството на заредения метален прах е от ключово значение за гарантиране успешното изграждане на изделието.

3. Определяне реалната позиция на изграждащата плоча.

Тъй като изграждащите плочи се използват многократно, след демонтиране на детайла и шлайфане е необходимо тяхната височина да бъде точно измерена. ProX DMP200 използва специална процедура,

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

при която ролерът (3) от фиг. 7 се позиционира над нея, а буталото (5) придвижва плочата докато не бъде отчетен физически контакт между двата обекта.

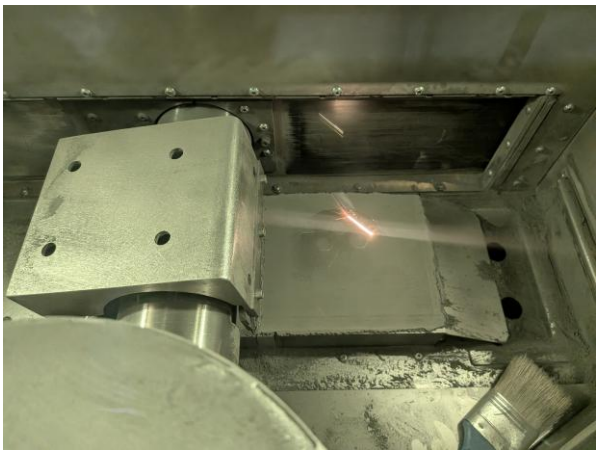
4. Осигуряване на инертна среда в работната зона на 3D принтера.

По време на синтероване температурата в зоната на топене на металния прах надвишава 1200° С. Поради това е необходимо работната зона да бъде запълнена с безкислородна газова среда. При работа със стомана за запълване на газовата среда може да бъде използван азот. Но при работа с титан, или алуминий е необходимо използването на инертен газ – аргон.

5. Импортиране на управляващият файл.

Софтуерният продукт 3DXpert осигурява управляващ файл, който трябва да се импортира в 3D принтера. След успешното му импортиране 3D принтера има готовност изграждането да бъде стартирано.

На фиг. 9 е показан момент от работата на принтера.

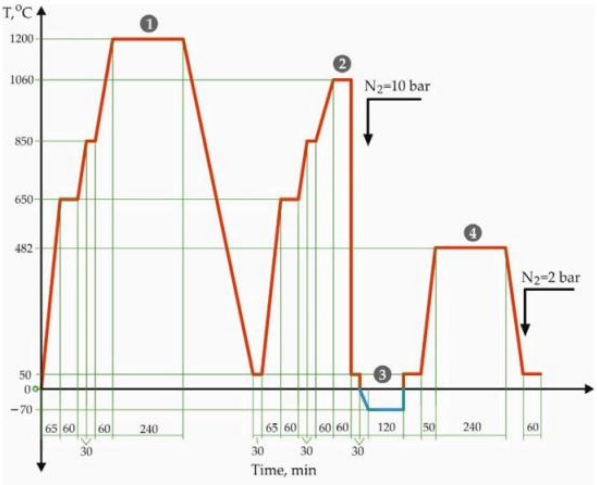


***Фиг. 9**. Момент от процеса на работа на принтера.*

След като процеса по изграждане на детайла приключи той трябва да бъде демонтиран от изграждащата плоча. Демонтирането може да се извърши, като поддържащите елементи се отрязват механично, или с използване на нишкова ерозия.

Тъй като изградените конформни канали са запълнени с метален прах, който не може да бъде премахнат директно, свалениият от изграждащата плоча детайл се почиства в ултразвукова вана. По този начин се премахват всички остатъци от метален прах.

Вторият етап от технологичният процес за производство на заготовката е термичната обработка. При него детайлът получава пълен комплекс от необходимите за експлоатацията си физико – механични свойства. При проектиране на технологичния процес е взето под внимание методът на производство на металния прах, а именно, че атомизираните в азотна среда прахове имат голяма аустенитна фракция (до 81%), в обема си. Именно за това като операция за термообработка е прието обработването в студ, непосредствено след закаляването, преди операцията за стареене. Термообработката на детайла е извършена във вакуумна пещ HTS-245 и хладилна камера ICT C750. Време – температурната крива на термичната обработка е представена на фигура 10.



***Фиг. 10**. Време – температурна крива на термичната обработка.*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Технологичния процес на термична обработка включва следните етапи:

❖ **Етап 1: Първоначално нагряване и задържане (Аустенитизация)**

- Процесът включва стъпаловидно нагряване (прегряване на 650°C и 850°C), за намаляване на вътрешните напрежения получени при лазерното синтероване.
- Достига се максимална температхарактеристикиура от **1200°C**, последвана от задържане за 240 минути.

❖ **Етап 2: Повторно нагряване и закаляване**

- Нагряване до **1060°C**.
- Следва рязко охлаждане (закаляване) с азот (N_2) под налягане от **10 bar,** със надкритична скорост.

❖ **Етап 3: Поднулево (криогенно) третиране**

- Охлаждане до **-70°C** за 120 минути. Целта е трансформиране на остатъчния аустенит в мартензит за повисока твърдост и стабилност.

❖ **Етап 4: Отвръщане**

- Нагряване до **482°C** със задържане от 240 минути за намаляване на крехкостта и премахване на вътрешните напрежения.
- Охлаждане с азот (N_2), при **2 bar**.

След термичната обработка е измерена твърдост от HRc = 50, достатъчна за удовлетворяване експлоатационните изисквания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статията е разгледан и проектиран технологичен процес за изработване на заготовка за формообразуващ елемент – вложка от шприцформа за инжекционно формоване на полимери, по технологията DMLS. Анализирани са технологичните възможности за изграждане на конформни канали за оптимизиране на технологичния процес на инжекционното формоване. На база съществуваща априорна информация е проектиран и реализиран технологичен процес за термична обработка на получената заготовка, със необходимите за експлоатацията физико-механични характеристики на инструмента.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] PHULL, Gurpreet Singh; KUMAR, Sanjeev; WALIA, R. S. Conformal cooling for molds produced by additive manufacturing: a review. International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 2018, 9.1: 1162-1172.

[2] Pye R., Injection Mold Design (Longman, 1989).

[3] https://3dincredible.com/conformal-cooling-with-3d-printing-know-the-advantages/. (достъпен на 24.05.2026 г.)

[4] Nozar M, Zetková I, Hanzl P, Daňa M. A CUSTOMER'S VIEW ON KEY ASPECTS OF METAL ADDITIVE MANUFACTURING. Annals of DAAAM & Proceedings. 2017 Jan 1;28.

[5] XU Xiaorong, Conformal cooling and rapid thermal cycling in injection molding with 3D printed tools, Ph.D. dissertation, Dept. Mech. Eng., Massachusetts Institute of Technology, USA, Sept1999.

[6] Sachs Emanuel, Allen Samuel, Guo Honglin, Banos Javier, Cima Michael, Serdy James and Brancazio David. Progress on Tooling by 3D printing; conformal cooling, dimensional control, surface finish and hardness. Solid freeform fabrication proceedings, September 1997, pp.115-123

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

[7]https://www.aksteel.nl/files/downloads/clf_datasheet_armco_17-4_ph_pdb_euro_102022_89.pdf (достъпен на 24.05.2026 г.)

[8] Duncheva, G.; Maximov, J.; Dunchev, V.; Anchev, A.; Todorov, V.; Argirov, Y.; Anastasov, K.; Mitev, H. Effects of Heat Treatment Procedures and Diamond Burnishing on Tensile Properties and Surface Integrity of Additively Manufactured 17-4PH Steel Cylindrical Parts. Materials 2026, 19, 2192. https://doi.org/10.3390/ma19112192

[9]https://openstax.org/books/additive-manufacturing-essentials/pages/2-3-powder-bed-processes. (достъпен на 24.05.2026 г.)

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ
„МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

АНАЛИЗ НА СЪЩЕСТВУВАЩИ ИЗСЛЕДВАНИЯ ВЪРХУ НОСЕЩИ СИСТЕМИ ОТ ТИПА КРИЛО–ВИТЛО ЗА VTOL ЛЕТАТЕЛНИ АПАРАТИ

ANALYSIS OF EXISTING STUDIES ON WING–PROPELLER LIFTING SYSTEMS FOR VTOL AIRCRAFT

Мартин Атанасов Зикямов, Христиан Петров Панайотов
Technical University of Sofia, Plovdiv Branch
Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

Abstract
The paper presents an analytical review of existing numerical and experimental studies related to wing–propeller lifting systems for vertical take-off and landing aircraft. The review focuses on tiltrotor, tiltwing and modern multi-propeller electric VTOL configurations used in unmanned aviation and urban air mobility. Special attention is paid to the aerodynamic interaction between the rotor or propeller slipstream and the wing, the download effect, the influence of disk loading, propeller arrangement, cruise efficiency, battery mass and mission range. The analysis shows that wing–propeller systems provide a promising compromise between vertical flight capability and improved energy efficiency in cruise flight, but their design requires a careful balance between hover performance, aerodynamic interference and structural mass.

Keywords: VTOL aircraft; wing–propeller system; tiltrotor; tiltwing; urban air mobility; propeller–wing interaction.

ВЪВЕДЕНИЕ

Вертикално излитащите и кацащи летателни апарати представляват едно от основните направления в развитието на съвременната безпилотна авиация и градската въздушна мобилност. При тях се търси съчетаване на две противоречиви изисквания: възможност за вертикално излитане, кацане и висене от ограничени площадки и постигане на висока енергийна ефективност при хоризонтален крейсерски полет. Това поставя носещите системи от типа крило–витло в центъра на изследователския интерес, тъй като те комбинират предимствата на витлото или ротора в режим на висене с предимствата на крилото в самолетен режим.

Наличните до момента числени и експериментални изследвания върху конвертопланите с носещи системи от типа крило–витло формират значителна база от знания, обхващаща както класическите разработки с наклоняем ротор и наклоняемо крило, така и съвременните електрически концепции за UAM и БЛС. Те са насочени към аеродинамичните характеристики в отделните режими на полета, устойчивостта и управляемостта, влиянието на геометричните параметри и енергийната ефективност при различни профили на мисията.

Целта на настоящия доклад е да систематизира основните резултати от съществуващи изследвания, свързани с носещи системи от типа крило–витло, и да изведе ключовите фактори, които трябва да бъдат отчетени при концептуалното проектиране на VTOL летателни апарати за безпилотни приложения и градска въздушна мобил-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

ност.

ИЗЛОЖЕНИЕ

1. Общи проектни изисквания и критерии

Първоначалните изследвания върху конвертопланите поставят като основна цел съчетаването на вертикално излитане и кацане с по-висока скорост и по-добра ефективност в хоризонтален полет. В тактико-техническото задание на Bell D266 например са заложени скорости от порядъка на 150–210 m/s и аеродинамично качество L/D ≥ 10 [1]. Още при първоначалния синтез на варианти схемите с наклоняемо витло и наклоняемо крило са определени като най-перспективни по отношение на очакваните летателни характеристики.

Основните параметри, които влияят върху ефективността на вертикалния режим, са сумарната ометаема площ и дисковото натоварване. За роторна или витлова система дисковото натоварване може да бъде записано като:

$$DL = T / A_R \quad (1)$$

където T е тягата, а A_R е сумарната дискова площ на витловата или роторната система. По-ниското дисково натоварване е свързано с по-ниска индуцирана скорост и по-ниска необходима индуцирана мощност във висене, но изисква по-големи диаметри и води до конструктивни и компоновъчни ограничения. Поради това изборът на диаметър, брой витла и разположение спрямо крилото е компромис между ефективност, маса, размери и аеродинамична интерференция.

Разглежданите конфигурации могат да бъдат систематизирани според начина на създаване на подемна сила във вертикален и хоризонтален режим, както е показано на Фиг. 1.

Фиг. 1. *Обобщена класификация на VTOL/eVTOL конфигурации с акцент върху носещите системи от типа крило–витло.*

2. Изследвания на конфигурации с наклоняем ротор

Първоначалните експериментални изследвания при конфигурации с наклоняем ротор са свързани с прототипи на хеликоптери с напречна схема. На базата на тези разработки е направен изводът, че носещо витло с ниско дисково натоварване, около 50 kg/m² или приблизително 490 N/m², е подходящо за летателни апарати с вертикално излитане и кацане [1], [2]. Впоследствие е отчетена тенденция към увеличаване на проектното дисково натоварване, като за леки ЛА се посочват стойности до 70 kg/m², приблизително 687 N/m², а за тежки транспортни VTOL апарати се разглеждат и по-високи стойности.

Съществен недостатък на конфигурацията с наклоняем ротор е проявата на т.нар. download effect. При висене или вертикално излитане крилото се намира в индуцираното течение на ротора и действа като преграда, върху която се създава сваляща сила. Тази сила намалява ефективно използваната тяга и изисква по-голяма разполагаема мощност. Експерименталните из-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

следвания на мащабен модел на V-22 Osprey показват, че относителната сила на сваляне може да бъде ограничена чрез подходящо отклонение на механизацията и промяна на разстоянието между ротор и крило [3], [4].

При ъгъл на задкрилките около 67° е отчетена минимална относителна сила на сваляне от порядъка на 9%. Други изследвания посочват, че download effect може да достигне около 12%, като за компенсиране на тези загуби е необходимо съществено увеличаване на енерговъоръжеността [5]. Това води до по-висока маса на конструкцията и силовата установка, както и до намаляване на полезния товар при определени проектни ограничения.

Изследванията върху геометрията на вихровата следа зад ротора показват, че увеличаването на коефициента на тягата изменя скоростното поле между 0.25R и 0.75R и влияе върху интензивността на взаимодействието с крилото. Следователно взаимното разположение на ротора и крилото, отклонението на механизацията и режимът на работа на ротора са определящи фактори за загубите във висене.

3. Работа на витлото в крейсерски режим

При преминаване от носещ към тягов режим честотата на въртене и диаметърът на витлото оказват съществено влияние върху неговите характеристики. При нарастване на скоростта на полета и постоянна ъглова скорост се увеличава ъгълът на протичане към лопатата, а ефективният ъгъл на атака намалява. За поддържане на работа в близост до оптималния режим е необходимо или увеличаване на честотата на въртене, или изменение на ъгъла на поставяне на лопатите [1].

При конвертоплани с голям диаметър на ротора честотата на въртене е ограничена от необходимостта периферната скорост в краищата на лопатите да остане дозвукова. Това намалява възможността за оптимална работа на ротора в крейсерски режим и може да доведе до по-нисък пропулсивен КПД. В обзорните данни е посочено, че при директно сравнение КПД на витлата в крейсерски полет е около 69% за V-22 и около 84% за CL-84 [5]. Това показва, че изборът между наклоняем ротор и наклоняемо крило е свързан не само с вертикалния режим, но и с ефективността на силовата установка в хоризонтален полет.

4. Изследвания на конфигурации с наклоняемо крило

При конфигурациите с наклоняемо крило въздушното течение от витлата обтича крилото по начин, различен от този при наклоняемия ротор. Вместо крилото да създава сваляща сила, в определени режими се наблюдава положителен прираст на подемната сила, породен от взаимодействието между витловата струя и крилото [5], [9]. В този случай витлата обикновено са фиксирани спрямо крилото и функционират като носещи във вертикален режим и като тягови след накланяне на крилото.

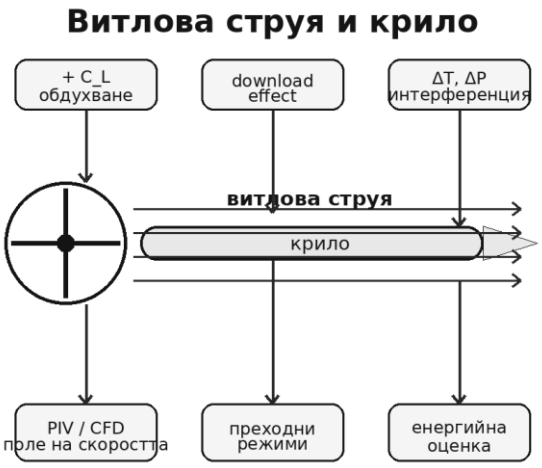
Числените изследвания на преходния режим при наклоняемо крило показват, че витлото оказва значително влияние върху коефициентите C_L и C_D. При скорости 8 m/s и 45 m/s са отчетени изменения на подемната сила и съпротивлението в зависимост от ъгъла на наклон на крилото [10]. Ефектът е по-силен при ниски скорости, когато индуцираната скорост от витлото е съпоставима или по-голяма спрямо скоростта на набега. При по-висока скорост на полета относителното влияние на витловата струя намалява.

Независимо от положителния ефект върху подемната сила, конфигурациите с наклоняемо крило се характеризират със силно нелинейно и понякога нестабилно поведение в преходните режими. Летателните изпитвания на CL-84 показват възможност за внезапна загуба на подемна сила при определени режими на преход [7]. Експе-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

рименте в аеродинамична тръба свързват това явление с откъсване на течението около крилото при ъгли на атака, близки до критичните. Това налага внимателно моделиране на преходните режими и оценка на устойчивостта и управляемостта.

Основните физични ефекти, които се наблюдават при взаимодействие между витловата струя и крилото, са обобщени на Фиг. 2.



Фиг. 2. *Основни взаимодействия между витлото, витловата струя и крилото.*

5. Многовитлови електрически VTOL конфигурации

Съвременните електрически VTOL концепции често използват многовитлови схеми, което позволява разпределение на тягата, намаляване на механичната сложност и по-гъвкаво управление. При тези конфигурации обаче се появяват допълнителни аеродинамични взаимодействия между отделните витла, както и между витлата и крилото.

Сравнения между изолирано витло и витло, работещо в условия на интерференция, показват, че взаимното разположение може съществено да промени разполагаемата тяга и мощност [11]. При напречна схема влиянието върху характеристиките е сравнително слабо при малки ъгли на атака, но нараства при по-големи ъгли, като е отчетено намаляване на тягата на задното витло до около 30% при постоянен коефициент на напредване J. При коаксиални схеми и крейсерски режим намаляването на тягата на задните витла може да достигне до 80% в неблагоприятни случаи.

В изследвания на тандемно разположени витла при eVTOL конфигурации е показано, че ъгълът на наклон, степента на застъпване и взаимното разположение на витлата влияят пряко върху коефициентите на тяга и мощност [12]. При определени стойности на геометричното разминаване загубите значително намаляват и характеристиките на задното витло се доближават до тези на изолирано витло. Това показва, че компоновката на многовитловата система трябва да се разглежда като самостоятелен оптимизационен проблем.

6. Силова установка, маса и далечина на полета

При конвенционалните летателни апарати разполагаемата енергия се определя предимно от крейсерския режим. При VTOL схемите обаче режимите на висене и преход изискват значително по-висока енерговъоръженост и оказват силно влияние върху общата енергия на мисията. Типичният профил на UAM мисия включва вертикално излитане, преход, отлитане, изкачване, крейсерски полет, снижение, долитане, повторен преход и вертикално кацане [13].

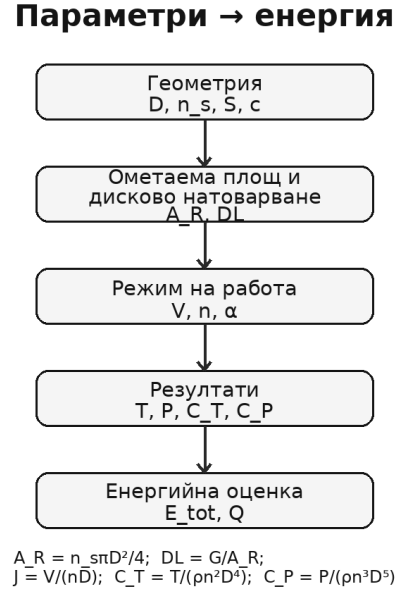
Характеристиките на акумулаторната батерия не могат да се разглеждат отделно от профила на мисията. В литературата се посочва, че до 2035 г. може да се очаква достигане на специфична енергия до 500 Wh/kg, което би намалило преките оперативни разходи с 20–25% [13]. В същото време ограниченията на съвременните батерии, обикновено около 200–250 Wh/kg, мотивират разглеждането и на хибридни електрически схеми [14].

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Методики за предварително оразмеряване на хибридни VTOL апарати показват, че ограничението за висене и преход изисква приблизително два пъти по-висока енерговъоръженост в сравнение с някои условия на хоризонтален полет [14]. Това потвърждава необходимостта още в началния етап на проектиране да се разглеждат всички сегменти на мисията, а не само крейсерският участък.

Сравнителни изследвания между безкрил многовитлов eVTOL и конфигурация от типа wing–propeller или powered lift показват, че схемата с крило има предимство при мисии с по-голяма далечина. При примерна мисия със скорост 240 km/h, далечина 100 km и полезен товар 400 kg е установено, че конфигурациите с крило–витло имат по-благоприятно съотношение между празна маса и полезен товар при мисии над приблизително 40 km [15]. При много къси мисии безкрилата многовитлова схема може да бъде по-изгодна поради по-ниската конструктивна маса.

Обобщената последователност между геометричните параметри, режима на работа и енергийната оценка е представена на Фиг. 3.



Фиг. 3. *Връзка между геометрията на носещата система, режима на работа и енергийната оценка.*

7. Обобщение на основните тенденции

Обзорът на съществуващите изследвания показва, че няма универсална конфигурация, която да бъде оптимална едновременно във висене, преход и крейсерски полет. Конфигурациите с наклоняем ротор имат предимство по отношение на ниско дисково натоварване и ефективност във висене, но страдат от download effect и ограничена ефективност в крейсерски режим при големи диаметри. Конфигурациите с наклоняемо крило използват по-ефективно обтичането на крилото от витловата струя, но са чувствителни към нелинейни явления и загуба на подемна сила в преходните режими.

Многовитловите електрически схеми създават възможност за опростяване на механизацията и по-добро управление, но въвеждат допълнителни загуби от интерференция. От гледна точка на масата и енергията на мисията крилото става все по-важно с увеличаване на далечината, тъй като намалява потребната мощност в най-дългия сегмент от полета. Поради това носещите системи от типа крило–витло представляват перспективна основа за разработване на безпилотни и пилотирани VTOL апарати за градска въздушна мобилност.

8. Методични следствия за последващи изследвания

Направеният обзор позволява да се формулират няколко методични следствия, които са важни при планиране на числени и експериментални изследвания на носещи системи от типа крило–витло. Първо, не е достатъчно да се разглежда само изолираното витло или изолираното крило. Резултатите показват, че съществена част от загубите или прирастите на подемна сила се формират именно при взаимното обтичане на двата агрегата. Поради това изследователският модел трябва да включва не само геометрията на витлото, но и реалистична част от крилото, върху която попада витло-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

вата струя.

Второ, при сравнение между различни диаметри и режими на работа е необходимо използване на безразмерни параметри. Коефициентът на напредване J, коефициентът на тяга C_T и коефициентът на мощност C_P позволяват резултатите от различни режими да бъдат представени в обобщен вид. За витло с диаметър D и честота на въртене n те могат да бъдат записани по следния начин:

$$J = V / (nD), \quad C_T = T/(\rho n^2 D^4), \quad C_P = P/(\rho n^3 D^5) \quad (2)$$

където V е скоростта на набега, ρ е плътността на въздуха, T е тягата, а P е мощността на витлото. Тези зависимости са особено полезни при преход от моделни към реалноразмерни варианти, тъй като дават възможност да се отчетат влиянието на диаметъра, оборотите и скоростта на полета върху работния режим на витлото.

Трето, при анализ на режим на висене пропулсивният КПД не е подходящ критерий, тъй като скоростта на полета е нулева. В този случай по-подходящ е критерият Figure of Merit, който сравнява идеалната индуцирана мощност с действителната потребна мощност. Това е важно при оценка на електрически VTOL апарати, защото дори кратки периоди на висене могат да имат значително влияние върху общата енергия на мисията.

Четвърто, при крейсерски режим основната задача е да се намали съпротивлението и да се използва крилото като основна носеща повърхност. В този режим големите диаметри на витлата могат да имат двоен ефект. От една страна те намаляват дисковото натоварване и подобряват вертикалния режим. От друга страна те увеличават челното съпротивление и налагат ограничаване на честотата на въртене, за да се избегнат неблагоприятни ефекти в краищата на лопатите. Следователно оптималният диаметър не може да бъде избран само по критерия за висене.

Пето, от гледна точка на експерименталната проверка е необходимо едновременно измерване на силовите параметри и на структурата на течението. Измерванията на тяга, мощност и обороти дават интегрална оценка на работата на витловата система, докато визуализацията или измерването на полето на скоростта позволява да се оцени разположението на витловата струя, нейното взаимодействие с крилото и зоните на възможно откъсване на течението. Така експерименталните резултати могат да бъдат използвани както за валидиране на CFD модел, така и за уточняване на причините за получените аеродинамични сили.

Шесто, при съвременните многовитлови eVTOL конфигурации изборът на схема трябва да отчита не само броя на витлата, но и тяхното взаимно разположение. Интерференцията между предни и задни витла може да промени значително тягата и мощността на отделните агрегати. Това означава, че при предварителното оразмеряване на ЛА не е достатъчно да се умножат характеристиките на едно изолирано витло по броя на витлата. Необходимо е да се отчете загубата от взаимно влияние, особено при преходни режими и при компактни схеми, характерни за UAM апаратите.

Седмо, съотношението между масата на батерията, масата на конструкцията и полезния товар зависи силно от далечината на полета. При много къси мисии безкрилите многовитлови схеми могат да бъдат конкурентни поради конструктивната простота. При по-голяма далечина обаче крилото намалява потребната енергия в крейсерски режим и компенсира увеличената конструктивна маса. Това е основен аргумент в полза на конфигурациите от типа крило–витло при мисии на градска и край-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

градска въздушна мобилност.

Тези следствия очертават необходимостта от комбинирана методика, включваща концептуално оразмеряване, CFD симулации и експериментална проверка. Подобен подход позволява да се изследва връзката между геометричните параметри на носещата система, енергийната ефективност и ограничителните условия на мисията. Това е особено важно при ЛА, при които малки изменения в диаметъра на витлото, дисковата площ или площта на обдухваната крилна секция могат да доведат до съществена промяна в необходимата мощност.

Систематизираните резултати показват, че изборът на носеща система е свързан с балансиране на няколко противоречиви изисквания, обобщени на Фиг. 4.

Фиг. 4. *Основни проектни компромиси при избор на рационална конфигурация крило–витло*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализът на съществуващите изследвания показва, че носещите системи от типа крило–витло са подходящо направление за VTOL летателни апарати, при които се търси компромис между вертикално излитане и кацане и ефективен хоризонтален полет. Основните проектни параметри са дисковото натоварване, диаметърът и разположението на витлата, геометрията на крилото и профилът на мисията.

При конфигурациите с наклоняем ротор основен проблем е силата на сваляне, породена от взаимодействието между роторната струя и крилото. При конфигурациите с наклоняемо крило се наблюдава положителен прираст на подемната сила, но съществува риск от нелинейно поведение и откъсване на течението в преходните режими. При многовитловите електрически схеми допълнително значение придобива интерференцията между витлата.

Полученото обобщение показва необходимостта от последващи числени и експериментални изследвания на връзката между геометричните параметри на витловата система, обтичането на крилото и общата енергия за изпълнение на мисията. Тази връзка е ключова при избора на рационална конфигурация на летателен апарат за градска въздушна мобилност и безпилотни приложения.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] K. G. Wernicke, “Tilt Prop-Rotor Composite Research Aircraft,” Nov. 1968.
[2] W. Z. Stepniewski, Rotary-Wing Aerodynamics. Vol. I: Basic Theories of Rotor Aerodynamics. Boeing Vertol Company, Philadelphia, PA.
[3] M. A. McVeigh, “The V-22 Tilt-Rotor Large-Scale Rotor Performance/Wing Download Test and Comparison with Theory,” Eleventh Euro-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

pean Rotorcraft Forum, Sep. 1985.
[4] F. F. Felker, P. R. Shinoda, R. M. Heffernan, and H. F. Sheehy, Wing Force and Surface Pressure Data from a Hover Test of a 0.658-Scale V-22 Rotor and Wing. NASA, 1990.
[5] W. F. Chana and T. M. Sulliyan, “The Tilt Wing Configuration for High Speed VSTOL Aircraft,” ICAS-94-6.3.2, pp. 871–889.
[6] C. Barnes, “A CFD Analysis of the Download Reduction for the V-22 Osprey Wing,” Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports, 2004.
[7] R. A. Champine, H. L. Kelley, and J. P. Reeder, “Summary of a Flight-Test Evaluation of the CL-84 Tilt-Wing V/STOL Aircraft,” NASA, L-6570, Mar. 1970.
[8] W. Johnson, “Airloads and Wake Geometry Calculations for an Isolated Tiltrotor Model in a Wind Tunnel,” Sep. 2001.
[9] M. H. Rizk, “Propeller Slipstream/Wing Interaction in the Transonic Regime,” AIAA, Jan. 1980.
[10] Q. Huang, G. He, J. Jia, Z. Hong, and F. Yu, “Numerical Simulation on Aerodynamic Characteristics of Transition Section of Tilt-Wing Aircraft,” Aerospace, vol. 11, p. 283, 2024.
[11] D. Perdolt, M. Thiele, D. Milz, M. May, R. Kuchar, and M. Hornung, Comparison of Multi-Fidelity Rotor Analysis Tools for Transitional and Low Speed Flight Regimes, 2021.
[12] T. Stokkermans, D. Usai, T. Sinnige, and L. Veldhuis, “Aerodynamic Interaction Effects Between Propellers in Typical eVTOL Vehicle Configurations,” Journal of Aircraft, vol. 58, pp. 1–19, 2021.
[13] X. Qiao, G. Chen, W. Lin, and J. Zhou, “The Impact of Battery Performance on Urban Air Mobility Operations,” Aerospace, vol. 10, no. 7, 2023.
[14] X. Qiao and J. Zhou, “A Multi-Fidelity Preliminary Sizing Methodology for Hybrid-Electric VTOL Aircraft,” Aerospace Science and Technology, vol. 168, 2026.
[15] O. Ugwueze, T. Statheros, N. Horri, M. Bromfield, and J. Simo, “An Efficient and Robust Sizing Method for eVTOL Aircraft Configurations in Conceptual Design,” Aerospace, vol. 10, p. 311, 2023.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

СУПЕРКОНДЕНЗАТОРИ

SUPERCAPACITORS

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

Ivan Simeonov
Technical University of Gabrovo

Hristo Kilifarev
Technical University of Gabrovo

Egnar Özdikililer
Technical University of Gabrovo

Borislav Nedev
Technical University of Gabrovo

Abstract
This report reviews supercapacitors in terms of historical background, development and definition, working principles and construction technologies, basic parameters and characteristics, application areas and usage features. The advantages and disadvantages of supercapacitors, the manufacturing process and the difficulties encountered are evaluated. In addition, important points that should be considered as criteria for selecting supercapacitors, as well as precautions for their use, are indicated.

Keywords: Supercapacitors; Electric vehicles (EV); Energy storage; Rechargeable batteries; Clean energy; History.

ВЪВЕДЕНИЕ

Суперкондензаторите са актуална тема в електрониката, енергетиката и материалознанието, тъй като предлагат бързо зареждане и дълъг живот, съчетавайки свойствата на кондензатори и акумулаторни батерии. Те са известни със своите стойности на капацитет до хиляди фаради и кратко време на зареждане и разреждане. Тясната връзка на суперкондензаторите със системите за бързо зареждане е особено подчертана. Суперкондензаторите играят важна роля в системите за бързо зареждане, благодарение на способността им да се зареждат и разреждат много по-бързо от конвенционалните батерии. Особено в приложения, изискващи висока моментна мощност, могат значително да увеличат производителността на системите [1].

ИЗЛОЖЕНИЕ

Исторически сведения и развитие на суперкондензаторите

1. Първоначалната концепция

Основите са положени през 1879 г., когато германският физик Херман фон Хелмхолц описва феномена на електрическия двоен слой на границата между твърдо вещество и електролит. Това е фундаменталният принцип, който по-късно прави суперкондензаторите възможни.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

2. Патентът на General Electric

През 1957 г. инженерът от General Electric Хауърд Бекер (Howard I. Becker) подава първия патент за електрохимичен кондензатор, използвайки порести въглеродни електроди. Устройството съхранява енергия чрез поляризация, но все още е в експериментален стадий.

3. Откритието на Standard Oil (SOHIO)

По време на експерименти с горивни клетки, изследователи от Standard Oil of Ohio (SOHIO) разработват съвременния двуслоен кондензатор. Доналд Бос (Donald Boos) регистрира ключовия патент за устройство с активен въглен и електролит през 1970 г.

4. 70-те и 80-те години: Първа комерсиализация

През 1971 г. компанията NEC лицензира технологията от SOHIO и за първи път я пуска на пазара под името "Supercapacitor" (Суперкондензатор). Първоначално те намират приложение като резервно захранване за компютърна памет.

5. 90-те години до днес: Бум в електрониката

Развитието на нанотехнологиите и материалознанието през 21-ви век изстрелва суперкондензаторите напред. Въвеждането на наноматериали (като графен и въглеродни нанотръби) драстично увеличава тяхната енергийна плътност. Днес те са незаменими във високотехнологични сфери, енергетиката, автомобилостроенето (системи за регенеративно спиране) и космическите технологии.

Суперкондензаторни технологии

Суперкондензаторите са известни като електрохимични устройства за съхранение на енергия и действат като мост между традиционните кондензатори и батерии. Те имат важно място в областта на съхранението на енергия благодарение на тяхната висока плътност на мощността, възможности за бързо зареждане и разреждане и дълъг живот. Суперкондензаторите съхраняват енергия електростатично, което им позволява да се зареждат и разреждат по-бързо от акумулаторните батерии.

Суперкондензаторът е компактно устройство за съхранение на енергия, което поддържа електричество на повърхността на своите електроди, вместо да разчита на химични реакции, както при батерията. Това му осигурява бързо зареждане, висока плътност на мощността и дълъг цикъл на живот. Материали като активен въглен и графен създават широка повърхност за съхранение на заряд, докато електролитът осигурява преносна среда за движение на йоните по време на всеки цикъл на зареждане и разреждане.

Суперкондензаторите не съхраняват толкова енергия, колкото една батерия, поради по-ниското работно напрежение на (около 2.7 V), но тяхната скорост и издръжливост ги правят ценни в много системи. С развитието на нови материали и хибридни дизайни, те продължават да се приближават към решенията за съхранение на енергия от следващо поколение.

Суперкондензаторите имат особено важно значение там където е необходим бърз двупосочен трансфер на енергия. Те могат да се използват успешно в много различни сфери, от електрически превозни средства до обществен транспорт, от преносими електронни устройства до системи за възстановяване на енергия. Техният потенциал за повишаване на енергийната ефективност, намаляване на вредните емисии и допринасяне за устойчиви енергийни решения, определя суперкондензаторните технологии като първостепенни сега и за в бъдеще.

В таблица 1 са посочени някои от характеристиките на суперкондензатор, акумулаторна батерия и конвенционален кондензатор за сравнение.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

***Таблица 1**. Основни характеристики на суперкондензатор, акумулаторна батерия и конвенционален кондензатор*

Характеристика	Супер-кондензатор	Батерия	Конвен-ционален кондензатор
Енергийна плътност	Средна	Висока	Ниска
Плътност на мощността	Висока	Средна	Висока
Време за презареждане	Много бързо	Бавно	Много бързо
Живот в брой цикли на презареждане	Дълъг (стотици хиляди)	Среден (хиляди)	Много дълъг (милиони)

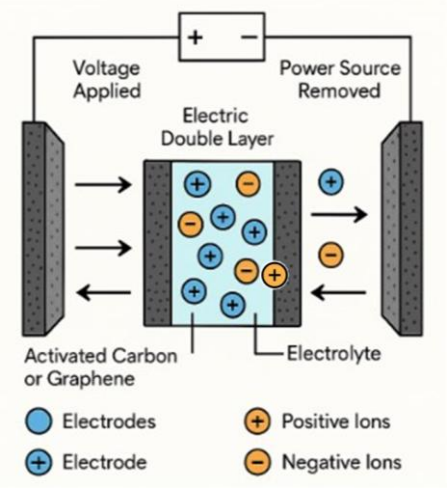
Принцип на работа на суперкондензаторите

Принципът на работа на суперкондензаторите се основава на механизми като електрохимичен двуслоен капацитет (EDLC) и псевдокапацитивност.

Суперкондензаторите, за разлика от конвенционалните кондензатори, са електрохимични устройства за съхранение на енергия, които съхраняват енергия електростатично и могат да достигнат много по-високи енергийни плътности. Техните принципи на работа се основават на образуването на двойни електрически слоеве и/или псевдокапацитивни ефекти. На тези принципи се дължат предимствата на суперкондензаторите, като бързо презареждане и дълъг експлоатационен живот.

Основните принципи на работа на суперкондензаторите са основани на концепциите за електрохимичен двоен слой (EDLC, Electric Double-Layer Capacitor) и псевдокапацитет. В EDLC електрическо поле се създава от натрупването на йони на границата между електродния материал и електролита. Това поле осигурява електростатично съхранение на енергия (фиг. 1). При псевдокапацитета влиза в действие допълнителен механизъм за съхранение на заряд, благодарение на редокс реакциите, протичащи на повърхността на електрода, което увеличава стойността на капацитета.

Примерна спецификация на суперкондензатор е показана в таблица 2.



***Фиг. 1**. Принцип на работа на суперкондензатори [3]*

***Таблица 2**. Спецификация на суперкондензатор*

Параметър	Типична стойност	Бележки
Номинално напрежение	2,7 – 3,0 V	Стандартни граници за една клетка според вида на електролита
Капацитет	1 – 5000 F	Зависи от размера и приложението
Енергийна плътност	5 – 10 Wh/kg	Много по-ниска от Li-батерии
Плътност на мощността	5000 – 15000 W/kg	Поддържа големи, краткотрайни енергийни импулси
ESR	5 – 30 mΩ	По-ниският ESR означава по-голяма ефективност
Живот (в цикли)	500000 – 1000000+	Много дълъг експлоатационен срок
Време за презареждане	1 – 10 секунди	Бързо презареждане в зависимост от конструкцията и капацитета
Работна температура	-40 до +65 °C	По-широк при някои видове за индустриални приложения
Ток на утечка	0,5 – 5 mA	Варира според напрежението, конструкцията и материалите
Скорост на саморазреждане	20 – 40% на ден	По-висока от тази на акумулаторните батерии
Размери	8 – 60 mm	Според капацитета, напрежението, конструкцията и материалите
Тегло	5 – 500 гр.	

Характеристики на суперкондензатора

- Висока изходна мощност - могат да доставят голяма моментна мощност, тъй като енергията се съхранява на повърхността на електродите.
- Бързо презареждане - те се зареждат/разреждат за секунди, а не за часове, тъй като процесът на електростатично натрупване на енергия е много по-бърз от

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

сравнително бавните химични реакции при акумулаторните батерии.

- Дълъг експлоатационен живот - могат да издържат стотици хиляди (и повече) цикли на зареждане и разреждане с много малко износване, което ги прави надеждни за дългосрочна употреба.
- Широк температурен диапазон на работа - те остават стабилни както при ниски, така и при високи температури, което ги прави подходящи за тежки условия като тези в автомобилни системи и индустриално оборудване.
- Ниска енергийна плътност - те съхраняват по-малко количество енергия от еквивалентна акумулаторна батерия за единица тегло (W/kg). Това налага използването на по-голям брой кондензатори, свързани по определена схема в батерия, която заема повече място и има по-голямо тегло.
- Ниско еквивалентно серийно съпротивление ESR (Equivalent series resistance) - това позволява по-бърз трансфер на енергия, по-добра ефективност и по-малки загуби в топлина.
- Проста конструкция - основни компоненти са електроди с много голяма площ, електролит и сепаратори, които са капсуловани в херметичен корпус, което прави суперкондензаторът издръжлив и лесен за поддръжка.
- Безопасна работа - тъй като няма опасни химически реакции, а също и рискът от термични проблеми е много по-нисък, отколкото при батериите.
- Възможност за разреждане до 0 V – за разлика от всички видове акумулаторни батерии, при които работните напрежения се изменят в тясно ограничени диапазони (например от 2.5 V до 4.2 V при Li-базирани батерии). Това води до редица предимства, като по-широката работна зона (около 2.7 V) и опростяването на външната електроника за контрол и преобразуване на енергията при презареждане.

Видове суперкондензатори

- Електрически двуслойни кондензатори - EDLC съхраняват енергия чрез образуване на двоен електрически слой върху повърхността на техните електроди. Те използват материали на базата на въглерод и предлагат бързо зареждане, висока мощност и дълъг живот. Това са най-често срещаните супер кондензатори, използвани в ежедневните приложения (фиг. 2, а).
- Псевдокондензатори - те съхраняват енергия чрез бързи редокс (редукция-окисление) реакции на повърхността на електродите. Те използват материали като метални оксиди или проводими полимери, което им дава по-висок капацитет и по-добра енергийна плътност от EDLC. Те са полезни, когато устройството се нуждае от повече съхранена енергия, за сметка на скоростта на презареждане (фиг. 2, б).
- Хибридни суперкондензатори - съчетават характеристиките на EDLC и псевдокондензаторите. Те могат да използват различни материали за всеки електрод, осигурявайки баланс между висока мощност и по-голям обем съхранена енергия. Те са хибрид между традиционните суперкондензатори и акумулаторните батерии (фиг. 2, в).

а) б) в)

***Фиг. 2**. Суперкондензатори:* а) *Електрически двуслоен кондензатор;* б) *Псевдокондензатор;* в) *Хибриден суперкондензатор*

Разликите между суперкондензатор и кондензатор са представени в таблица 3.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

***Таблица 3**. Разлики между суперкондензатор и кондензатор*

Характеристика	Суперкондензатор	Кондензатор
Съхранение на енергия	Съхранява големи количества енергия чрез порести електроди и електролит	Съхранява малко енергия чрез диелектрик между електродите (плочите)
Капацитет	Много висок (фаради до хиляди фаради)	Нисък до умерен (микро- до милифаради)
Скорост на зареждане	Бързо зареждане с голяма енергия	Изключително бърз, но с ограничена енергия
Живот (в цикли)	Много дълъг, зависи от напрежение, конструкция, електролит и др.	Много дълъг, зависи от напрежение, конструкция, диелектрик и др.
Енергийна плътност	По-ниска от батерия; по-висока от кондензатор	Много ниска
Приложения	Резервно захранване, регенеративни спирачки, задачи с висока мощност	Филтриране, времеви вериги, изглаждане на сигнали
Конструкция	Електроди с голяма площ, електролит и сепаратор; използва електрически двоен слой и/или редокс реакции	Електроди (плочи) с диелектричен слой между тях (и електролит)
Цена	По-висока	По-ниска

Общи приложения на супер кондензатор

- Регенеративно спиране на електрически и хибридни превозни средства – съхранява спирачната енергия и я освобождава по време на ускорение, за да подобри ефективността и да намали натоварването на батерията.
- Резервно захранване за електроника и контролери - осигурява кратковременна поддръжка по време на кратки прекъсвания, за да продължат устройствата да работят без прекъсване.
- Защита на паметта при загуба на захранване - осигурява енергия за запазване на данните, когато основното захранване спадне внезапно.
- Системи за събиране на енергия - съхранява малки количества енергия за бърза употреба, събрана от слънчеви клетки, източници на вибрации и други алтернативни източници.
- Изглаждане на мощността в електрически вериги - стабилизира напрежението и намалява внезапните му спадове в системи с променящи се товари.
- Преносими и ръчни устройства – които се нуждаят от бързо зареждане и чести цикли.
- Интелигентни измервателни уреди и IoT устройства – осигурява кратковременни енергийни нужди за измерване, комуникация и предаване на данни.
- Индустриални машини и автоматизация – за осигуряване на захранване на двигатели, задвижващи механизми и роботизирани системи, които изискват резки пикове на енергия.
- Инсталации за възобновяема енергия - балансира бързите промени в мощността в слънчевите и вятърните системи, за подобряване на стабилността.
- Системи за обществен транспорт – за осигуряване на бързото зареждане на спирките и честите тръгвания и спирания през целия ден на автобусите и трамваите.

Предимства на суперкондензатора

- Бързо презареждане - може да се презареди за секунди, защото се основава на съхранение на повърхностен заряд вместо на бавни химични реакции.
- Висока изходна мощност - доставят големи краткотрайни енергийни порции.
- Дълъг живот - стотици хиляди цикли на презареждане с много малка загуба на производителност.
- Широк температурен диапазон – запазва стабилни работни характеристики при автомобилна и промишлена употреба.
- Лесен за обслужване - тяхната проста конструкция ги прави надеждни с минимална поддръжка (обслужване).
- Висока ефективност - по-голямата част от съхранената енергия може да бъде използвана при разреждане с малки загуби.
- Безопасна работа - при химичните реакции рискът от термични проблеми е много по-нисък в сравнение с този при акумулаторните батерии.
- Ниско вътрешно съпротивление - осигурява високомощен, кратковременен,

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

енергиен трансфер и намалява отделянето на топлина.

Ограничения на суперкондензаторите

- Ниска енергийна плътност;
- По-високо саморазреждане - губят съхранената енергия по-бързо, когато не се използват (съхраняват);
- По-висока цена на ватчас - поради скъпата технология за производство на наноматериали за електродите и по-ниската енергийна плътност.
- По-ниско напрежение на клетка – това налага свързване на множество клетки в суперкондензаторна батерия, за да се достигнат по-високи нива (фиг. 3).

***Фиг. 3**. Свързване на множество суперкондензатори в батерия [3]*

- По-голям размер – нуждата от голям капацитет изисква повече и по-големи компоненти, които не са приложими в компактни конструкции.
- Кратко време за съхранение на енергията - дългосрочното съхранение на енергия е ограничено от високата степен на саморазряд.
- Стръмна характеристика на разряд - не са подходящи за директно използване в приложения, където е нужно стабилно ниво на напрежението, което налага външни електронни схеми за стабилизирането му.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суперкондензаторите предлагат бързо захранване, дълъг живот на цикъла и надеждна работа, което ги прави полезни в много съвременни системи. Въпреки че не могат да съхраняват толкова енергия, колкото акумулаторните батерии, те се отличават с бързи процеси на презареждане, стабилност на параметрите, дълъг експлоатационен живот с много по-голям брой цикли, широк работен температурен диапазон, по-висока ефективност и безопасност. Основното ограничение в текущите технологии при суперкондензаторите е тяхното сравнително по-ниско работно напрежение (около 3V), което основно зависи от използваните електролити. По този проблем се работи и в бъдеще се очаква да се публикуват резултати, относно нови електролити, които издържат на по-високи напрежения. Разбирането на техните характеристики, ограничения и правилна употреба помага да се избере най-добрия тип за конкретен проект и да се използва безопасно и ефективно.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] HostDragons. Суперкондензаторни технологии и системи за бързо зареждане. *HostDragons*, 2025. URL: https://www.hostragons.com/bg/блог/суперкондензаторни-технологии-и-сис/

[2] Куцаров, С. Суперкондензатори. *Engineering Review*, 2026. URL: https://www.engineering-review.bg/bg/superkondenzatori/2/438/

[3] IC Components. Super Capacitors: Working Principle, Components, Benefits, and Applications. *IC Components*, 2026. URL: https://bg.ic-components.com/blog/Super-Capacitors-Working-Principle,Components,Benefits,and-Applications.jsp

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ’ 2026

МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛИ ОТ НАПРЕЧНИ СЕЧЕНИЯ НА ПЪРВИЧНИ ДАННИ ОТ УПРАВЛЕНИЕ НА ТРАФИКА, ОСНОВАНИ НА ПРОСТРАНСТВЕНИ, ВРЕМЕВИ И СТРУКТУРНИ ИЗМЕРЕНИЯ

MATHEMATICAL MODELS FROM CROSS-SECTIONS OF PRIMARY TRAFFIC MANAGEMENT DATA BASED ON SPATIAL, TEMPORAL AND STRUCTURAL DIMENSIONS

Mariya Zhekova, Mitko Shopov
1) Technical University of Sofia, Faculty of Electronics and Automation, Department of Computer Systems and Technologies, Plovdiv, Bulgaria
2) Center of Competence "Smart mechatronic, eco- and energy-saving systems and technologies"

Abstract
This study examines the development of mathematical and statistical models using primary data from traffic management systems in the municipality of Plovdiv. The data include multidimensional characteristics such as time stamp, direction, speed, lane, vehicle class, weight, and country of registration. The main goal is to transform raw observations into analytical structures with high added value by using cross-sections that combine spatial, temporal and structural dimensions. The methodological approach is based on a three-layer architecture – empirical, statistical, and mathematical. In the empirical layer, the primary data are organized in summary tables; in the statistical layer, conditional expectations and probabilistic dependencies are estimated; and in the mathematical layer, functional dependencies, regression models and density estimates are built. Using the five defined cross-sections, the following are analysed: traffic dynamics over time, speed distribution, lane usage, the dependence between vehicle weight and class, and the ratio of domestic to international traffic. The results show significant dependencies among key variables, including a strong relationship between class and weight, between lane and speed, and weaker or moderate dependencies between speed and weight. Interpolation and smoothing techniques were also used, allowing the transition from discrete observations to continuous functions, as well as visualizations for interpreting the results. The study demonstrates how statistical generalizations can be transformed into applicable mathematical models for analysis, forecasting and supporting management decisions in the field of transport infrastructure.

Keywords: traffic management systems; traffic analytics; traffic dynamics; traffic dependences; mathematical models.

ВЪВЕДЕНИЕ

Настоящото изследване разглежда изграждането на математически и статистически модели въз основа на първични данни от системи за управление на трафика в община Пловдив. Данните включват многомерни характеристики като времеви отпечатък, посока на движение, скорост, пътна лента, клас превозно средство, тегло и държава на регистрация. Основната цел е преобразуване на суровите данни (наблюдения) в аналитични структури чрез използване на напречни сечения/разрези (cross-sections), които комбинират времеви, пространствени и структурни измерения [2, 6].

Методологичният подход се базира на

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

трислойна архитектура – емпиричен, статистически и математически слой. В емпиричния слой първичните данни се организират в обобщени таблици; в статистическия слой се оценяват условни очаквания и вероятностни зависимости; а в математическия слой се изграждат функционални зависимости, регресионни модели и оценки на плътността [3, 4].

Чрез дефинираните пет основни напречни сечения се анализират: динамиката на трафика във времето, разпределението на скоростите, използването на пътните ленти, зависимостта между тегло и клас на превозните средства, както и съотношението между вътрешен и международен трафик [1, 5]. Резултатите показват наличие на значими зависимости между ключови променливи, включително силна връзка между клас и тегло, както и между лента и скорост, и по-слаби или умерени зависимости между скорост и тегло.

Използвани са техники за интерполация и изглаждане, които позволяват преминаване от дискретни наблюдения към непрекъснати функции, както и визуализации за интерпретация на резултатите [4]. Изследването демонстрира как статистическите обобщения могат да бъдат трансформирани в приложими математически модели за анализ, прогнозиране и подпомагане на управленски решения в областта на транспортната инфраструктура [2].

Въз основа на суровия първичен набор от данни (вж. Табл. 1), са изведени пет напречни профила (сечения). Те предоставят висока стойност за статистически цели, за нуждите на бизнес анализаторите, за оценка на интензитета на пътния трафик, както и за бъдещи прогнози и планирания в община Пловдив.

Таблица 1. *Първични данни от управлението на трафика на гр. Пловдив*

Дата/ час	Посока	Държ.	Ско-рост	Клас	Лента	Дълж.	Тегло
14.12.2024 0:07:11	Околовръстно	BG	44	1	L6	2272	1434
14.12.2024 0:17:06	Околовръстно	HU	50	0	L5	3600	0
14.12.2024 0:17:10	Околовръстно	BG	49	0	L5	3100	0
14.12.2024 0:18:11	Околовръстно	ES	45	0	L5	3700	0
14.12.2024 0:18:13	Околовръстно	BG	44	0	L5	3300	0
14.12.2024 0:18:36	Център	-	47	2	L2	6800	7462
14.12.2024 0:18:44	Център	-	51	1	L2	4400	3200
14.12.2024 0:18:56	Център	-	60	2	L2	5000	4149
14.12.2024 0:19:04	Околовръстно	DE	46	0	L5	3700	0

От предоставените набори от данни, където всеки ред представлява едно наблюдение за отделно превозно средство, са конструирани и изведени таблично обобщени концептуални структури и аналитични математически модели, съответстващи на основните първични параметри.

1. НАПРЕЧНИ СЕЧЕНИЯ НА ПЪРВИЧНИТЕ ДАННИ

Cross-section 1. Трафик на движението в определена посока спрямо дата/час. *Променливи: Посока × Дата*.

Разрезът разкрива пикови периоди на задръствания в посока Център спрямо посока Околовръстен път, като поддържа управлението на трафика и планирането на облекчения при засилен трафик. Може да изчисли по-висока гъстота в посока Център в определени часове спрямо по-плавен поток в посока Околовръстен път, както и да идентифицира пикови часове и свободни прозорци извън тях.

Cross-section 2. Разпределение на скорост по посока и лента (платно). *Променливи: Скорост × Посока × Лента*.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Разрезът оценява безопасността и съответствието с ограниченията (разлики в скоростта в посока Център спрямо Околовръстно) и открива рискови модели (напр. тежкотоварни средства, превишаващи скоростта към Околовръстен път) [5]. Може да предвиди и препоръча по-ниски скорости за превозни средства от лента L2 в посока Център и съответно по-високи скорости за превозни средства в ленти L5–L6 в посока Околовръстен път.

Cross-section 3. Видове превозни средства в посока спрямо лента. *Променливи: Лента × Клас × Посока*.

Разрезът помага за оценка на начина, по който се използва пътната инфраструктура (при разпределение на лентите), и идентифицира дали тежкотоварните превозни средства заемат подходящите платна [1]. Дава изводи за това дали дадена лента (напр. L1) се използва по-често от леки превозни средства, докато по-крайните ленти (L5–L6) са по-тясно свързани с тежък товар или интензивен групов трафик.

Cross-section 4. Характеристики на натоварването – тегло, клас и посока. *Променливи: Тегло × Клас × Посока*.

Това сечение е от решаващо значение при поддръжката на пътищата и анализа на натовареността в инфраструктурата [7]. То подпомага планирането при натоварване на настилката и регулирането на товарния транспорт. Идентифицира дали превозни средства с тегло около 1000–5000кг, както и много тежки превозни средства (до ~60 тона) се движат към Околовръстното.

Cross-section 5. Разпределение на трафика по държава, посока и дата/час. *Променливи: Държава × Посока × Дата*.

Разрезът измерва международния транзит през град Пловдив и спомага за вземане на решения за различни стратегически мерки (напр. товарни коридори, въздействие върху трафика в гранични зони и др.) [5]. Може да направи изводи дали повечето превозни средства са с българска регистрация (BG), както и дали чуждестранните превозни средства по-често се срещат в посока Околовръстно шосе (транзит).

2. КОНЦЕПТУАЛНИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗА ВСЯКО НАПРЕЧНО СЕЧЕНИЕ

Следва анализ и доказателство за това как статистиката се превръща в реално аналитично моделиране [3]. От първичните набори от сурови данни са конструирани таблици (разрези) – обобщени концептуални структури. Табличните разрези групират и обобщават наблюденията, а с помощта на регресионни модели се описват зависимостите между величините чрез математически функции [3].

2.1. Cross-section 1 – Интензитет на трафика по дата и направление/посока

Конструира се функция за интензитет на трафика, която оценява натоварването и безопасността. С нея може да се изчисли броят на превозните средства, да се определят дяловете по часове и посока, да се изчислят вероятности и зависимости [1]. Трафикът може да се изчисли и като общ обем за конкретен времеви интервал и като условна вероятност по направления [3].

Общият трафик за конкретен час се представя чрез:

$$N(t) = N(t, \text{Център}) + N(t, \text{Околовръстно}) \quad (1)$$

Ако се търсят преминаващите автомобили в определена посока спрямо общия брой, формулата има вида:

$$P(d \mid t) = N(t, d) / N(t) \quad (2)$$

Ако полученият брой се раздели на интервала от време Δt, се получава абсолютният интензитет на колите за определен период:

$$I(t, d) = dN / dt \quad (3)$$

Интензитетът на трафика в момент t и посока d отразява скоростта, с която расте броят на преминалите автомобили [1].

2.2. Cross-section 2 – Разпределение на скоростта по посока и пътна лента

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

В това сечение не се броят коли, а се осредняват техните скорости [1]. Средната скорост зависи от платното и от посоката на движение:

$$E[V|P,D] = f(P,D) \quad (4)$$

където V е скорост, P е пътна лента, D е посока на движение и е функция на условните очаквания за очаквана скорост при определени пространствени условия [3].

Алгоритъмът за намиране на средна скорост по посока и платно на движение е: 1) фиксира се една комбинация (напр. посока – център, лента – L2); 2) избират се само редовете, които отговарят точно на тази комбинация; 3) вземат се скоростите от тези филтрирани редове; 4) изчислява се средната им стойност: Средна скорост = Сбор на скоростите / Брой автомобили.

Математически записа E[V|P,D] дефинира условна средна стойност на скоростта [3], тъй като не се отнася за целия поток (E[V]), а за конкретна подгрупа. Понеже на всяка двойка (P,D) се съпоставя точно една средна скорост, таблицата AvgSpeed(P,D) дефинира условната средна стойност като функция от платното и посоката.

2.3. Cross-section 3 – Вероятностно разпределение на клас превозно средство по пътните ленти

Класовете превозни средства се кодират по следния начин: 1. Леки автомобили; 2. Лекотоварни; 3. Среднотоварни; 4. Тежкотоварни; 5. Тежкотоварни с ремарке; 6. Автобуси; 7. Мотоциклети; 0. Други.

Разрезът (клас, лента) отговаря на въпроса: „Ако се знае в коя лента е даден автомобил, какво е разпределението по класове в нея?“ [1]. Намира се броят Count (Lane, Class), отразяващ количеството автомобили за всяка комбинация, означен за кратко като N(l, c).

$$P(C = c \mid L = l) = N(l, c) / N(l) \quad (5)$$

Това изразява вероятността даден автомобил да е от клас c, при условие че се движи в лента l [3]. Числителят N(l, c) е броят на автомобилите от търсения клас в конкретната лента, а знаменателят N(l) е общият брой превозни средства в същата лента. Тъй като всеки автомобил в лентата принадлежи към някакъв клас, сумата от вероятностите по редове в получената таблица трябва да е равна на 1.

2.4. Cross-section 4 – Зависимост между клас на автомобила и неговото тегло

Този разрез показва, че средното тегло на превозното средство се определя в най-висока степен от неговия технически клас [5,7]. Създава се таблица AvgWeight(Class).

Алгоритъмът при търсене на средно тегло спрямо клас е следният: 1) групиране на превозните средства по променливата Клас (останалите параметри се игнорират); 2) за всеки клас се сумират теглата на автомобилите; 3) изчислява се средното аритметично тегло.

Във формулата, описваща тази зависимост:

$$E[W \mid C] = f(C) \quad (6)$$

теглото W зависи от класа C [3]. Този разрез дава типичното тегло за всеки клас и позволява по-лесно разбиране на структурата и натоварването от трафика [5,7].

2.5. Cross-section 5 – Разпределение по държави спрямо посоката на движение

Напречното сечение е представено чрез таблицата Count(Country, Direction). Когато се изследва съставът по държави за определена посока, моделът придобива следния вероятностен вид:

$$P(Country \mid Direction) = N(Country, Direction) / N(Direction) \quad (7)$$

където в числителя е броят на колите от дадена държава в съответната посока, а в знаменателя е общият брой коли, преминали в същата посока [3].

Това сечение показва международния състав на трафика и позволява да се оцени дали посоката влияе на произхода (държавата) на превозните средства [5]. Силата на тази зависимост се определя чрез изчисляване на разликата между вероятностите в двете посоки за една и съща държава: ако

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

разликата е < 0.05%, зависимостта е слаба, а ако е > 0.20%, тя се дефинира като силна.

3. ДИАГРАМИ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ НА ПОЛУЧЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ

Въз основа на направените концептуализации могат да бъдат изградени следните графични визуализации за целите на управленския анализ и вземането на конкретни решения:

– **Линейна диаграма на трафика във времето**, която интерпретира потока на движението (брой превозни средства) като непрекъсната функция на времето.

– **Стълбовидна диаграма**, която представя йерархичната зависимост на средната скорост спрямо клас превозното средство.

– **Многолинейна диаграма**, която използва лентите за движение, за да покаже динамиката и плътността на разпределение на автомобилите по платна.

– **Монотонна зависимост (почти стъпкова функция):** Отразява нелинейното нарастване на теглото на превозното средство спрямо неговия клас.

– **Категорично сравнение:** Представя процентното съотношение и произхода на трафика по държави за транзитния поток.

4. МАТЕМАТИЧЕСКА СТРУКТУРА НА ЗАВИСИМОСТИТЕ

4.1. Многовариантен модел на зависимости

Моделите интегрират пространствени, времеви и структурни вектори за постигане на висока точност на апроксимация [2].

4.2. Връзки от регресионен тип

- *Моделът на скоростта има вида:*

$$V = f_1(C, L, Lane, t) + \varepsilon \quad (8)$$

където f_1 е детерминистичната компонента, а ε е стохастичният шум [3]. Типичното линейно приближение има вида:

$$V \approx \alpha_0 + \alpha_1 C + \alpha_2 L + \alpha_3 t \quad (9)$$

- *Моделът на теглото се записва:*

$$W = f_2(C) + \varepsilon \quad (10)$$

Тъй като стойностите за теглото скачат рязко между отделните категории (напр. автобуси и камиони спрямо леки коли), функцията $f_2(C)$ се апроксимира като стъпкова функция.

- *При модела на потока:*

Броят на автомобилите в дискретен интервал се представя чрез индикаторна функция:

$$N(t, l) = \Sigma_i \, 1(vehicle_i \in (t, l)) \quad (11)$$

Преходът към непрекъснат поток се извършва чрез частна производна спрямо времето [1]:

$$I(t, l) = \partial N / \partial t \quad (12)$$

4.3. Вероятностни зависимости

Наличието на връзка се доказва чрез неравенството на съответните разпределения:

$$P(c \mid d) \neq P(c) \quad (13)$$

Това потвърждава, че разпределението на класа превозно средства зависи от посоката на движение [3].

4.4. Корелация / ковариация

За числовите променливи Cov(V, W) и Cov(Lane, W) математическият анализ показва слаба корелация между скорост и тегло, силна – между клас и тегло, и умерена – между пътна лента и клас превозно средство [3].

5. ИНТЕРПОЛИРАНЕ – ИЗГРАЖДАНЕ НА НЕПРЕКЪСНАТИ ФУНКЦИИ

5.1. От дискретни данни към функции

Наблюдават се дискретни точки (t_i, V_i), въз основа на които се оценява непрекъснатата функция на скоростта V(t) [1].

- *Метод 1. Пълзяща средна (Moving average)* – изглажда краткосрочния шум: $\hat{V}(t) = (1 / k) \, \Sigma \, V_i$ (14)
- *Метод 2. Изглаждане на ядрото (Kernel smoothing)* – генерира гладка функция без загуба на информация при границите на интервалите [4, 8]: $\hat{V}(t) = \Sigma \, Vi \, K((t - ti)/h) / \Sigma \, K((t - ti)/h)$ (15), където K е Гаусово ядро (Gaussian kernel), а h е честотна лента (bandwidth) [4].

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

- *Метод 3. Регресионен полином* – подходящ за идентифициране на глобални тенденции и трендове:

$$V(t) \approx a0 + a1t + a2t2 \quad (16)$$

5.2. Многомерна интерполация

Оценява се повърхността на отговора чрез дискретни условни средни стойности [3]:

$$f(C,L) \approx E[V \mid C,L] \quad (17)$$

5.3. Оценка на плътността (Density estimation)

За определяне на непрекъснатата плътност на разпределение на скоростта се използва непараметричен метод [4, 8]:

$$\hat{f}_V(v) = (1 / nh)\, \Sigma\, K((v - V_i)/h) \quad (18)$$

6. ВИДОВЕ ЗАВИСИМОСТИ

Въз основа на изградените математически структури, връзките между наблюдаваните променливи се класифицират в три нива [1, 3]:

- **Силни зависимости:** Тегло спрямо клас (W ← C); Клас спрямо посока (C ← D); Скорост спрямо посока (V ← D).
- **Слаби и умерени зависимости:** Връзка между скорост и тегло на автомобила (V ← W); Връзка между пътна лента и клас превозно средство (L ← C).
- **Причинно-следствени вериги:** Посока → Клас → Тегло → Скорост; Лента → Скорост; Време → Поток → Скорост; Държава → Посока на движение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящото изследване доказва, че чрез анализ, обработка и моделиране на първични данни от трафика могат да се извлекат аналитични зависимости и практически приложими резултати. Чрез използването на напречни сечения и математическо моделиране е постигната успешна интеграция на данните, което позволява разбиране на поведението и интензитета на транспортните потоци.

Изведените модели създават научна основа за оптимизация на управлението на трафика, подобряване на пътната инфраструктура, повишаване на безопасността и прогнозиране на натоварванията. Освен теоретичен принос, изследването предлага приложна рамка за изграждане на аналитични интелигентни системи на общинско ниво. Като бъдеща работа се очертава необходимостта от калибриране на регресионните модели с реални параметри, прилагане на методи за редукция на размерността и разработване на предсказващи алгоритми в реално време.

Благодарности

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

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

[1] Treiber, M., & Kesting, A. (2013). *Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation*. Springer Science & Business Media.

[2] Cascetta, E. (2009). *Transportation Systems Analysis: Models and Applications*. Springer Science & Business Media.

[3] Washington, S., Karlaftis, M., Mannering, F., & Anastasopoulos, P. (2020). *Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis*. 3rd ed., CRC Press.

[4] Silverman, B. W. (1986). *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. Chapman and Hall.

[5] Leduc, G. (2008). *Road Traffic Data: Collection Methods and Applications*. Working Papers on Energy, Transport and Climate Change N.1, JRC 47967, European Commission.

[6] Zhang, J., Wang, F.-Y., Wang, K., Lin, W.-H., Xu, X., & Chen, C. (2011). Data-driven intelligent transportation systems: A survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(4), 1624–1639.

[7] Jacob, B., & Feypell-de La Beaumelle, V. (2010). Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology. *IATSS Research*, 34(1), 9–15.

[8] Wand, M. P., & Jones, M. C. (1995). *Kernel Smoothing*. Chapman and Hall.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

АВТОМАТИЗИРАН ПРОЦЕС ЗА МИГРИРАНЕ ОТ СИСТЕМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА РЕЛАЦИОННИ БАЗИ ДАННИ КЪМ NOSQL

AUTOMATED PROCESS FOR MIGRATION FROM A RELATIONAL DATABASE MANAGEMENT SYSTEM TO NOSQL

Radoslav Furnadzhiev, Mitko Shopov, Nikolay Kakanakov
1) Technical University of Sofia, Faculty of Electronics and Automation, Department of Computer Systems and Technologies, Plovdiv, Bulgaria
2) Center of Competence "Smart Mechatronic, Eco-and Energy-Saving Systems and Technologies", 4000 Plovdiv, Bulgaria

Abstract

Driven by the exponential growth of heterogeneous real-time data and the scalability demands of advanced fields such as Intelligent Transportation Systems (ITS), contemporary database management is steadily shifting from relational systems (RDBMS) toward NoSQL data stores. However, manual database migration remains a complex and error-prone process due to the lack of a unified transformation framework. To address this gap, this paper proposes a technology-agnostic, automated four-stage migration pipeline comprising relational metadata extraction, workload-driven schema transformation based on query logs, parallelized bulk data transfer, and a self-correcting verification loop. Each stage is formally conceptualized through detailed pseudocode, integrating schema-mapping, query-mapping, and optional middleware techniques into a unified process. Developed within laboratory C4.1 of the Center of Competence "Smart Mechatronic, Eco-and Energy-Saving Systems and Technologies", the primary contribution of this work lies in synthesizing these distinct methodologies into a single, reproducible framework applicable to document-oriented, column-family, and key-value targets, thereby establishing a solid baseline for future Big Data and experimental evaluations.

Keywords: relational database, NoSQL, automated data migration, schema transformation, MongoDB, big data.

1. INTRODUCTION

Over the last decade, the volume and variety of data produced by web applications, social networks, mobile devices, and IoT systems have grown so rapidly that the relational model, dominant since the 1970s, no longer represents the most appropriate storage paradigm for every application class. Relational database management systems (RDBMS) were designed around a rigid schema and the ACID transactional properties, both of which become difficult to maintain when the workload requires unlimited horizontal scalability, schema flexibility, and high availability across geographically distributed nodes [1,2].

NoSQL data stores emerged as an answer to these limitations. Their less constrained data structures, schema-on-read approach, and design for distribution allow them to manage semi-structured and unstructured data more efficiently than traditional RDBMS [1]. As a consequence, an increasing number of organizations face the practical problem of migrating their existing relational databases to a

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

NoSQL data store, while preserving data integrity and minimizing application-level changes.

Manual migration, however, is a complex and error-prone activity. The lack of a universally accepted, fully automatic transformation process means that database administrators must combine multiple ad hoc techniques to map relational schemas to document, column-family, or key-value structures and to translate SQL queries into the corresponding NoSQL query languages [3,4]. Numerous partial solutions have been proposed in the literature, ranging from schema-mapping algorithms and middleware adapters to fully automated migration frameworks [2, 4-8], but a unified, technology-agnostic process tailored for engineering laboratories remains an open research topic.

The present paper, prepared within the activities of laboratory C4.1 of the Center of Competence "Smart Mechatronic, Eco-and Energy-Saving Systems and Technologies", addresses this gap by proposing an automated migration process from an RDBMS to a NoSQL database. The main objectives are: (i) to summarise the main approaches reported in the literature; (ii) to identify their strengths and limitations; and (iii) to integrate them into a single, reproducible four-stage process, formalized through pseudocode, that can be used as a baseline for further experimental work in the laboratory. The main limitation of the present study is that it focuses on the methodological side of the migration: a full quantitative experimental evaluation is left for future work.

2. BACKGROUND

2.1. Relational vs. NoSQL data models

An RDBMS stores data in two-dimensional tables connected by primary and foreign keys, enforces strong typing, and provides transactional guarantees through the ACID properties (Atomicity, Consistency, Isolation, Durability). SQL is used both for schema definition and for data manipulation. While very mature and well understood, this paradigm becomes a bottleneck when data sizes reach the petabyte scale and latency-sensitive applications must scale horizontally across many nodes [1,2].

NoSQL is a broad term for a family of non-relational data stores that follow the BASE properties (Basically Available, Soft state, Eventually consistent). They are commonly classified in four categories:

- key-value stores (e.g., Redis, DynamoDB), in which data is stored as pairs of unique keys and arbitrary values;
- document stores (e.g., MongoDB, CouchDB), in which records are semi-structured JSON or BSON documents;
- column-family stores (e.g., Apache Cassandra, HBase), optimized for analytical queries over very large data sets;
- graph databases (e.g., Neo4j, AllegroGraph), designed for highly connected data.

Document-oriented stores, and in particular MongoDB, are the most frequently chosen target for relational-to-NoSQL migrations, mainly because their nested document model can naturally accommodate parent-child relationships through embedding [2,5,6,8].

2.2. Motivation for database migration

The literature consistently identifies the following reasons for migrating from an RDBMS to a NoSQL data store: (i) the inability of relational systems to scale beyond a single high-end server without significant performance degradation; (ii) the need to manage semi-structured and unstructured content (sensor readings, JSON payloads, log files, multimedia metadata); (iii) the demand for continuous availability in cloud-hosted services; and (iv) the lower operating costs offered by horizontally scalable clusters of commodity nodes [1,2,8].

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

3. RELATED WORK

The problem of automating the relational-to-NoSQL migration has been investigated from several complementary angles, summarised below.

3.1. Schema-mapping approaches

The authors of [6] describe a procedure for converting a relational schema into a document-oriented NoSQL cloud database,

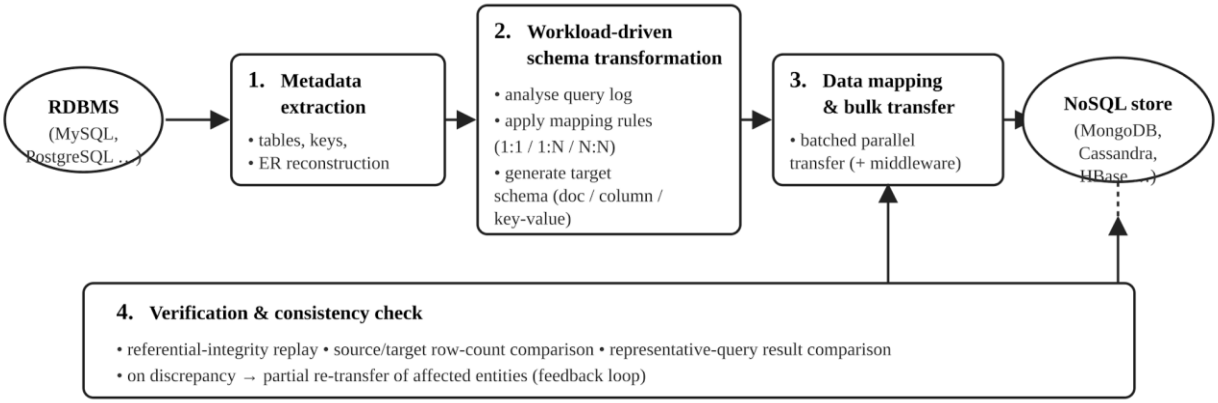


Fig. 1. *Overall pipeline of the proposed automated migration process from RDBMS to NoSQL.*

with the resulting collections preserving the integrity constraints of the source schema. In [8] the authors propose a "mid-model" that captures both the structural characteristics of the source data and the dominant query patterns of the application, so that the destination is organized to favor the most frequent access paths.

An automated algorithm that couples schema reconstruction with subsequent data transformation to minimize manual intervention during the migration from a relational to a NoSQL store is presented in [5].

3.2. Middleware and framework-based approaches

A NoSQLayer is introduced in [7], a framework comprising a migration module that transfers data from MySQL to MongoDB and a mapping module that serves as a persistence layer, translating application requests so that the source code remains essentially unchanged. Experiments reported by the authors show that the overhead introduced by the additional layer becomes negligible as the data volume increases, making the solution particularly attractive for web-scale applications.

3.3. Automatic schema transformation

An automatic SQL-to-NoSQL schema transformation between MySQL and HBase is described in [3]. Tables are converted into column families, and the corresponding queries are rewritten accordingly. The authors report that, after denormalization, access performance for content-management workloads improved by at least 45%.

3.4. Programming-language-driven transformation

The authors of [1] describe a data-transformation pipeline from SQL to MongoDB built on top of the R programming language. The approach exploits R's data-manipulation primitives to convert relational records into corresponding document representations, making it especially convenient for analysts already working in a statistical computing environment.

3.5. End-to-end automated tools

DLoader, an end-to-end approach that transforms data from MySQL into either Cassandra (column-family) or MongoDB (document-oriented), is proposed in [2]. Their

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

experiments suggest that, for many workloads, Cassandra requires less storage space and offers higher query performance after the migration, while MongoDB provides more natural support for nested entities. In [4], the authors add a comparative study of automatic transformation rules from data-warehouse schemas to NoSQL targets, highlighting the trade-offs between target families.

4. PROPOSED AUTOMATED MIGRATION PROCESS

Building on the techniques reviewed in Section 3, we propose a four-stage automated process for migrating from an RDBMS to a NoSQL data store. The process is technology-agnostic on the target side: it specializes in document-oriented, column-family, or key-value stores. Figure 1 summaries the overall pipeline, while Sections 4 formalize each stage in pseudocode.

4.1. Stage 1: Extraction of relational metadata

The first stage queries the source RDBMS's information schema and reconstructs the Entity-Relationship (ER) diagram, including tables, attributes, primary and foreign keys, indexes, and existing constraints. This step is fully automated and serves as an input for all subsequent stages. The output is an internal representation S of the source schema, comparable in spirit to the schema-reconstruction step described in [6]. Algorithm 1 summarises the procedure.

Algorithm 1. Extract relational metadata

```
Input  : connection C to source RDBMS
Output : schema S = (T, A, PK, FK, IDX, G)
1.  T   <- query INFO_SCHEMA.TABLES(C)
2.  A   <- {};  PK <- {}
3.  FK  <- {};  IDX <- {}
4.  for each table t in T do
5.    A[t]   <- columns + types of t
6.    PK[t]  <- primary key cols of t
7.    FK[t]  <- foreign keys of t
8.    IDX[t] <- secondary indexes
9.  end for
10. build ER graph G from (T,PK,FK)
11. return S = (T,A,PK,FK,IDX,G)
```

4.2. Stage 2: Workload-driven schema transformation

Following [8], the destination schema is not derived solely from the source structure; the application's dominant query patterns are also taken into account. The procedure analyses the query log Q to assign a weight w(e) to every edge e of the ER graph, classifies the cardinalities of the source relationships, and applies three transformation rules:

1) one-to-one relationships are converted into embedded sub-documents (for document targets) or into additional columns within the same column family (for column-family targets);

2) one-to-many relationships are converted into embedded arrays when the cardinality is bounded and into references otherwise;

3) many-to-many relationships are converted either into two-way references or into a dedicated linking collection, depending on whether the typical query traverses the relation in both directions.

When the target is a key-value store, a canonical row-to-pair mapping is used as a fallback, in line with the automated algorithm proposed in [5]. Algorithm 2 formalizes the procedure.

Algorithm 2. Workload-driven schema transformation

```
Input  : source schema S, query log Q,
         target family F in {DOC,COL,KV}
Output : target schema S'
1.  W <- analyse_query_log(Q, S)
2.  R <- classify_rel(S) // 1:1,1:N,N:N
3.  S' <- {}
4.  for each table t in S.T do
5.    e <- new_entity(t)
6.    for each (t,u,card) in R do
7.      if card = '1:1' then
8.        embed(e, u, F)
9.      else if card = '1:N' then
10.       if bounded(u) and W[(t,u)] high
11.         then embed_array(e, u, F)
12.       else reference(e, u, F)
13.     else  // N:N
14.       if bidirectional(W,t,u)
15.         then two_way_ref(e, u, F)
16.       else link_collection(e, u, F)
17.   end for
18.   if F = KV then e <- canonical_kv(e)
19.   S'.add(e)
20. end for
21. return S'
```


Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

4.3. Stage 3: Data mapping and bulk transfer

Once the destination schema S' is fixed, the third stage performs the actual data transfer. To handle large volumes, data is transferred in batches of size B, and transfers are parallelized whenever the target supports concurrent writes. Following the architecture of NoSQLayer [7], a persistence layer P can be inserted between the application and the new database, so that legacy SQL queries are translated on the fly into the corresponding NoSQL operations until the application code is refactored.

Algorithm 3. Data mapping and bulk transfer

```
Input  : S, S', batch size B, useP flag
Output : populated NoSQL store N
1.  open connection N
2.  for each e in S' in topo. order do
3.    src <- origin_tables(e, S)
4.    offset <- 0
5.    repeat
6.      rows <- read_batch(src,offset,B)
7.      docs <- map(rows, e, S')
8.      parallel_for d in docs do
9.        N.insert(e.collection, d)
10.     end parallel_for
11.     offset <- offset + B
12.   until rows = empty
13. end for
14. if useP then deploy_layer(P,S,S')
15. return N
```

4.4. Stage 4: Verification and consistency check

The last stage performs three checks: (i) referential integrity is verified by replaying the foreign-key constraints on the destination data; (ii) row counts are compared between source and target; and (iii) a sample of representative queries is executed on both systems, and the results are compared. Any discrepancy triggers a partial re-transfer of the affected entities, closing the feedback loop shown in Figure 1.

Algorithm 4. Verification and consistency check

```
Input  : S, N, sample queries QS
Output : V in {OK, REPAIRED, FAIL}
1.  iter <- 0
2.  repeat
3.    marked <- {}
4.    for each e in S' do
5.      if count(e,N) != count(orig(e),S)
6.        then marked.add(e)
7.    end for
8.    for each fk in S.FK do
9.      if not replay_fk(fk, N) then
10.       marked.add(target_of(fk))
11.   end for
12.   for each q in QS do
13.     if exec(q,S) != exec(map(q),N)
14.       then marked.add(entities(q))
15.   end for
16.   if marked = empty then return OK
17.   retransfer(marked, S, N)
18.   iter <- iter + 1
19. until iter > MAX_ITER
20. return FAIL
```

5. DISCUSSION

Several recurring observations emerge from comparing the reviewed approaches with the proposed process. First, no single migration recipe fits all NoSQL families: document stores favor denormalization through embedding, column-family stores require careful design of the row key, and key-value stores impose the strongest constraints on the access patterns [1,2,5]. Second, taking the application workload into account is consistently reported as the single most effective factor in obtaining a destination schema that is not just correct but also efficient [2,8]. Third, intermediate middleware layers reduce the cost of application refactoring at the expense of additional runtime overhead, which is acceptable only for large data volumes [4,7].

The proposed process incorporates these three lessons. By keeping the workload analysis as a first-class input of Algorithm 2 and by leaving the use of a middleware layer optional in Algorithm 3, the process can be specialized either for a fully offline migration (with maximum freedom to optimize the destination schema) or for a phased online migration (with minimal disruption to the running application). The verification loop in Algorithm 4 finally guarantees that the migration is rolled back to a consistent state whenever discrepancies are detected.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

6. CONCLUSION

This paper has presented a four-stage automated process for migrating data from a relational database management system to a NoSQL data synthesizing techniques previously proposed in isolation in the literature. Each stage is formalized in pseudocode (Algorithms 1–4) so that the process can be implemented reproducibly. The originality of the contribution lies not in any individual stage but in the integration of schema extraction, workload-driven transformation, data transfer, and post-migration verification into a single, technology-agnostic pipeline that can serve as a methodological baseline for laboratory C4.1 of the Center of Competence.

Future work will focus on three directions: (i) a prototype implementation of Algorithms 1–4, (ii) experimental evaluation on representative datasets, comparing the schemas produced by the process against those obtained by purely structural transformations, and (iii) the extension of the process to graph databases, which are increasingly relevant for highly connected mechatronic and energy data.

Furthermore, the proposed automated migration framework has significant potential for both scientific and practical applications in Intelligent Transportation Systems (ITS). Modern ITS generates huge volumes of heterogeneous real-time data – from GPS telemetry and traffic sensor streams to critical V2X (Vehicle-to-Everything) communications. Efficient management of these dynamic streams requires a smooth transition from traditional relational databases to highly scalable NoSQL repositories. Implementing our four-stage pipeline in such systems would enable automated, error-free transformation of legacy infrastructure, providing the flexibility and low latency needed for Big Data processing in the transportation sector, a promising direction for future applied research.

ACKNOWLEDGEMENTS

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

REFERENCES

[1] Mahmood, A. A. Automated Algorithm for Data Migration from Relational to NoSQL Databases. Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences, 21(1), 60-65, 2018. doi: 10.29194/NJES21010060.

[2] Abo Dabowsa N. I., Maatuk A. M., Elakeili S., Akhtar Ali M. Converting Relational Database to Document-Oriented NoSQL Cloud Database. IEEE 1st International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA), pp. 381-386, 2021, doi: 10.1109/MI-STA52233.2021.9464488.

[3] Ghotiya S., Mandal J., Saravanakumar K. Migration from relational to NoSQL database. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 263(4), 042055, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/263/4/042055. [4] Hasan F., Bakar M. Data Transformation from SQL to NoSQL MongoDB Based on R Programming Language. 5th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), Ankara, Turkey, 2021, pp. 399-403, doi: 10.1109/ISMSIT52890.2021.9604548.

[5] Lee C.-H., Zheng Y.-L. Automatic SQL-to-NoSQL schema transformation over the MySQL and HBase databases. IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW), 2015, doi: 10.1109/ICCE-TW.2015.7216979.

[6] Yangui R., Nabli A., Gargouri, F. Automatic Transformation of Data Warehouse Schema to NoSQL Data Base: Comparative Study. Procedia Computer Science, 96, 255-264, 2016. doi: 10.1016/j.procs.2016.08.138.

[7] Rocha L., Vale F., Cirilo E., Barbosa D., Mourão F. A Framework for Migrating Relational Datasets to NoSQL. Procedia Computer Science, 51, 2593–2602, 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.05.367.

[8] Rajaram K., Sharma P., Selvakumar S. DLoader: Migration of Data from SQL to NoSQL Databases. In: Proc. of the Int. Conf. on Cognitive and Intelligent Computing (ICCIC 2021), Cognitive Science and Technology, Springer, Singapore, 2023, pp. 211–222, doi: 10.1007/978-981-19-2358-6_19.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

МРЕЖОВИ ТОПОЛОГИИ И РАЗГРЪЩАНЕ НА IOT-БАЗИРАНИ РЕШЕНИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНИ ПЪТИЩА

NETWORK TOPOLOGIES AND DEPLOYMENT OF IOT-BASED SOLUTIONS FOR SMART ROADS

Radoslav Furnadzhiev, Mitko Shopov, Maria Babanova
1) Technical University of Sofia, Faculty of Electronics and Automation, Department of Computer Systems and Technologies, Plovdiv, Bulgaria
2) Center of Competence "Smart Mechatronic, Eco-and Energy-Saving Systems and Technologies", 4000 Plovdiv, Bulgaria

Abstract
IoT technology transforms conventional roads into intelligent, data-driven systems by integrating sensor networks, wireless communication, and cloud processing for real-time monitoring. Choosing a network topology that balances coverage, energy, reliability, and throughput is a core challenge. This work surveys and compares the principal network topologies and deployment strategies for IoT-based smart roads by reviewing recent literature on star/LPWAN, mesh/WSN, and heterogeneous architectures, covering sensors, protocols, data processing, and node placement. Star/LPWAN suits sparse rural deployments; mesh (IEEE 802.15.4/TSCH, LoRa WMN) gives redundancy for dense urban use; heterogeneous 5G+WSN serves high-bandwidth video. A three-layer fog–cloud–mobile model dominates data processing, and spatial optimization of node placement cuts cost while preserving coverage. No single topology fits all scenarios; the paper synthesizes design guidelines for hybrid architectures and node placement within laboratory C4.1 of the Center of Competence "Smart Mechatronic, Eco-and Energy-Saving Systems and Technologies".

Keywords: Internet of Things, smart roads, wireless sensor networks, LoRa, TSCH, LPWAN, network topology, deployment optimization, fog computing.

1. INTRODUCTION

Road infrastructure underpins modern economic activity and social mobility. Road traffic accidents remain a leading cause of death and injury worldwide, with an estimated 2.22 million people injured annually [1]. At the same time, traffic congestion, poor road surface conditions, and inadequate environmental monitoring continue to reduce transport efficiency. Intelligent Transportation Systems (ITS) emerged in response to these challenges, integrating communication, control, and information-processing technologies into the transport infrastructure [1].

The Internet of Things (IoT) has dramatically expanded the possibilities of ITS by enabling low-cost, dense deployments of networked sensors across road environments. Modern smart road deployments collect vibration, temperature, humidity, noise, and optical data from embedded pavement sensors alongside roadside cameras, environmental monitors, and vehicle detectors [2]. These heterogeneous data streams support applications ranging from pavement condition assessment and road accident prevention to

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

autonomous sign control and adaptive traffic management.

A critical design decision in any IoT smart road system is the choice of network topology. Star topologies, where sensors communicate directly with a central gateway over long-range links, offer simplicity and low power consumption but introduce a single point of failure. Mesh topologies, in which nodes relay data through neighboring devices, provide redundancy and extended coverage but increase complexity and energy use. Heterogeneous architectures combine multiple radio technologies cellular, licensed, and unlicensed to meet QoS requirements for high-bandwidth applications such as video surveillance [5].

This paper, prepared as part of the activities of laboratory C4.1 of the Center of Competence "Smart Mechatronic, Eco-and Energy-Saving Systems and Technologies", provides a comparative survey of network topologies and deployment strategies for IoT-based smart road systems. Section 2 describes the sensor infrastructure. Section 3 analyses the principal network topologies. Section 4 discusses data processing architectures. Section 5 examines deployment optimization. Section 6 discusses findings, and Section 7 concludes.

2. SENSOR INFRASTRUCTURE FOR SMART ROADS

IN-ROADWAY SENSORS

In-roadway sensors are embedded directly in the pavement or subgrade and provide data on traffic flow, vehicle weight, and the road's structural condition. Tewolde [1] categorizes them as pneumatic road tube sensors, inductive loop detectors (ILD), magnetic sensors, and piezoelectric sensors. ILDs are the most widely deployed, producing vehicle count, presence, and occupancy data. Piezoelectric sensors measure axle weight and speed, enabling vehicle classification. Magnetic sensors detect perturbations in the Earth's magnetic field caused by passing ferrous vehicles.

Recent IoT-centric deployments complement these classical devices with micro-electromechanical systems (MEMS). Ye et al. [2] describe an integrated pavement monitoring system where MEMS accelerometers measure road vibration at 1000 Hz sampling frequency, while thermocouple sensors co-located in the same housing capture pavement temperature. The sensors are encased in corrosion-resistant stainless steel and embedded during slip-form paving, eliminating the post-construction groove-cutting that would otherwise shorten pavement service life.

Roadside and environmental sensors

Roadside sensors complement in-pavement devices by monitoring environmental and traffic conditions without requiring pavement integration. Radar sensors operating in the 1-30 GHz range measure vehicle speed, volume, and occupancy from overhead gantries [1]. Active and passive infrared sensors detect vehicle presence and queue length at intersections. Video cameras including night-vision units provide the richest data stream but impose the highest bandwidth demands on the network [1, 4].

Environmental monitoring sensors measuring ambient temperature, humidity, noise level, and wind speed and direction are deployed in gateway enclosures and communicate with the gateway via RS-485 buses [2]. Smart pole infrastructure integrates multiple sensor types CCTV, air-quality sensors, and public Wi-Fi access points into a single roadside mast, reducing installation costs and urban visual clutter [8, 9].

3. NETWORK TOPOLOGIES FOR IoT IN SMART ROADS

Star topology (LPWAN)

In a star topology, each sensor node transmits directly to a central gateway without relying on neighboring nodes for routing. Low Power Wide-Area Network (LPWAN) technologies

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

such as SigFox and LoRa are the dominant implementations. SigFox operates on unlicensed sub-GHz bands, offers link ranges exceeding 10 km in open terrain, and achieves years of battery life at the cost of very low data rates (~100 bps). LoRa uses chirp spread-spectrum modulation and achieves data rates up to a few kbps with adjustable spreading factors that trade throughput for range [6].

Al-Hamadi et al. [6] formulate an Integer Non-Linear Programming (INLP) optimization problem to maximize the lifetime of SigFox star networks under reliability constraints. Their model draws real-time environmental data from a peered cloud capturing phenomena such as dust storms that degrade radio links and adaptively adjusts the number of redundant transmission paths. The trade-off is explicit: activating additional paths increases the probability of message delivery but depletes battery energy faster. The optimal redundancy level balances these effects to maximize network operational lifetime.

Mesh topology (WSN/WMN)

Mesh networks allow every node to act as a data source and a relay, providing multiple paths between sources and gateways. This inherent redundancy makes mesh topologies well-suited for safety-critical smart road applications where a single node failure must not interrupt service. Two key standards are in common use: IEEE 802.15.4 (ZigBee/6LoWPAN) for short-range dense sensor networks, and TSCH (Time Slotted Channel Hopping, standardized in IEEE 802.15.4e), which schedules transmissions to minimize collisions and duty-cycle energy waste [6].

Torralba et al. [4] deploy a mesh WSN based on IEEE 802.15.4 with a 6LoWPAN adaptation layer in the Autonomous Intelligent Sign Control System (AISCS) for rural and suburban roads. Every fully functional device acts as a router, providing multiple paths from sensing units to the Local Controller Border Router. The mesh serves environmental sensors (luminosity, temperature, rainfall, humidity), LED sign actuators, and camera image-processing units connected via Ethernet. Backhaul to the Central Controller is provided by a 3G/UMTS link.

For smart pole systems, LoRa-based Wireless Mesh Networks (WMN) are preferred over pure star deployments because multi-hop communication extends coverage without increasing transmission power [8, 9]. Park and Lee [9] define the Multiple Coverage Mesh Network Problem (MC-MNP), which simultaneously optimizes smart pole locations and WMN connectivity. Gateways provide wired links to the city backbone, while smart pole sensors form the mesh with a maximum of five hops to a gateway with a limit derived from LoRa capacity studies. Kaiwartya et al. [7] further address fault tolerance in mesh-based WSN virtualization using an adapted non-dominated sorting genetic algorithm (A-NSGA) that jointly minimizes communication delay while maximizing fault tolerance.

Convergent fog-cloud-mobile model

Finogeev et al. [3] propose a three-level convergent computing model for the Smart Road Environment (SRE). The first level (fog computing) performs real-time sensor data collection and pre-processing at the network edge, executing multi-agent tasks data cleaning, clustering, and anomaly detection directly within the heterogeneous sensor network. The second level (cloud computing) aggregates pre-processed data in a server cluster, where computationally intensive analytics, including neural network-based accident forecasting, are performed. The third level (mobile computing) delivers visualization and decision-support interfaces to field personnel via smartphones and tablets.

The multi-agent fog architecture assigns specialized software agents to distinct tasks: polling photo-radar complexes via SNMP, maintaining local event logs in distributed hierarchical databases, uploading violation data in XML format, and aggregating time-series

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

statistics in CSV hyper-tables [3]. The cloud backend in [2] uses MongoDB for sensor data storage and exposes a RESTful API to a web-based visual interface that displays sensor status, road imagery, and vibration time-series in real time.

4. DEPLOYMENT STRATEGIES AND OPTIMISATION

Spatial optimization of node placement

The placement of IoT nodes and gateways strongly influences coverage, cost, and network connectivity. The authors [9] formalize smart pole siting as the MC-MNP: given a set of candidate sites, a fixed number of smart poles, p, and gateways, q, must be selected to maximize the population served (de facto population demand) while satisfying WMN connectivity constraints. Three sensor types with distinct coverage radii - air quality, CCTV, and public Wi-Fi are co-optimized; each gateway must be reachable from its associated sensors within five hops. Applied to the central business district of Seoul, the model shows that optimal locations cluster in high-demand commercial zones, with lower-demand peripheral areas covered as the number of poles increases.

A three-stage sequential analysis further reduces infrastructure cost: Wi-Fi pole locations determined in stage one serve as candidate sites for CCTV and air quality sensors in subsequent stages, exploiting the co-location opportunities of multi-functional smart poles [9]. The resulting coverage and cost trade-offs demonstrate that consolidating multiple services into a single pole significantly reduces the total number of installations required.

Network lifetime optimization

Battery-operated IoT nodes have finite energy budgets, and network lifetime defined as the time until the first node depletes its battery constrains the deployment's operational period. Al-Hamadi et al. [6] model lifetime maximization as an INLP problem for both star (SigFox) and mesh (TSCH) topologies. Their model uses environmental cloud data to estimate node/link failure probabilities and determines the optimal number of redundant transmission paths. In harsh environments (dust, extreme humidity), more paths are activated to maintain reliability at the cost of shorter lifetimes; in benign conditions, fewer active nodes conserve energy. Experimental evaluation shows that this adaptive approach outperforms static baseline models for both SigFox and TSCH.

Self-powered deployments sidestep battery constraints by harvesting ambient energy. Ye et al. [2] equip their pavement monitoring gateway with a 450 W solar panel combined with a lithium iron phosphate battery pack managed by a Battery Management System (BMS) implementing the Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm. The battery autonomy exceeds five years and is field-replaceable, enabling operation in remote road sections without external power lines.

Fault tolerance and resilience

Smart road networks must remain operational during node failures, radio interference, and physical damage. Kaiwartya et al. [7] address this through fault-tolerant virtual network embedding (VNE) in WSNs. Their A-NSGA solves a bi-objective optimization: maximizing fault tolerance - the probability that at least one path between source and destination remains operational after a link failure while minimizing communication delay. The algorithm discovers alternative path endpoints when a link or node fails, thereby supporting re-embedding without pre-allocating backup resources.

At the topology level, mesh networks inherently provide multi-path redundancy. AISCS [4] exploits this by routing sensor and actuator traffic through the mesh, so that the failure of any single relay node does not interrupt communication between sensing units and the local controller. The 6LoWPAN/IPv6 addressing scheme assigns unique 128-bit network addresses to all wireless nodes, enabling transparent rerouting at the network layer.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

5. ISCUSSION

The literature reviewed reveals that no single network topology is universally optimal for smart road IoT deployments. Table 1 summarises the key characteristics of the three principal topologies identified.

Characteristic	Star (LPWAN)	Mesh (WSN/WMN)	Heterogeneous
Coverage	Wide-area, km-scale	Dense, local	Flexible, multi-band
Data rate	Low (< 1 kbps)	Medium (≤ 250 kbps)	High (Mbps–Gbps)
Energy	Years on battery	Months–years	Grid or solar required
Resilience	Single GW failure risk	Multi-path redundancy	Handover-based

Table 1. Comparison of IoT network topologies for smart road deployments.

Rural and suburban roads favor star/LPWAN topologies due to low node density, long distances between monitoring points, and the absence of mains power. AISCS [4] supplements its WSN mesh with a 3G/UMTS backhaul, reflecting the practical reality that rural areas often lack fiber infrastructure. In urban corridors, mesh WMNs based on LoRa or IEEE 802.15.4 provide the path redundancy demanded by safety-critical sign control and intersection monitoring. At the same time, 5G links carry high-resolution video to the traffic management center.

The convergent fog-cloud-mobile model of Finogeev et al. [3] addresses the data processing challenge across all topology types by distributing computation: time-critical reactions (anomaly alerts, sign activation) execute at the fog layer within milliseconds, while resource-intensive analytics (accident forecasting, cross-city traffic modeling) run on cloud infrastructure.

D This architecture [2] closely mirrors the gateway-level processing, confirming its generality across different hardware platforms and sensor modalities.

6. CONCLUSION

This paper has surveyed network topologies and deployment strategies for IoT-based smart road systems, synthesizing findings from nine recent works spanning sensor technology, communication protocols, data processing architectures, and spatial optimization. Star/LPWAN topologies are appropriate for sparse, energy-constrained rural deployments where coverage range is paramount. Mesh topologies based on IEEE 802.15.4/TSCH or LoRa WMN provide the resilience required for safety-critical urban road environments. Heterogeneous multi-radio architectures are necessary when high-bandwidth sensors such as video cameras must coexist with low-bandwidth environmental monitors. The convergent three-layer fog-cloud-mobile computing model emerges as a broadly applicable data processing framework.

Optimal node placement formalised as a maximal coverage mesh network problem is a key lever for reducing infrastructure cost while maintaining service quality. Adaptive redundancy management and self-powering with solar energy further extend network lifetime and reduce maintenance burden. Future work should focus on the integration of 5G-V2X (Vehicle-to-Everything) communication with existing IoT sensor networks, AI-driven adaptive network management, and the development of standardised benchmarks for comparing smart road deployments across different urban and rural contexts.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was funded by the European Regional Development Fund within the OP "Research, Innovation and Digitalization Programme for Intelligent Transformation 2021-2027", Project CoC "Smart Mechatronic,

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Eco- and Energy-Saving Systems and Technologies", No BG16RFPR002-1.014-0005.

REFERENCES

[1] Tewolde G. S. Sensor and Network Technology for Intelligent Transportation Systems. IEEE International Conference on ElectroInformation Technology (EIT 2012), Indianapolis, IN, USA, 2012.

[2] Ye Z., Wei Y., Yang S., Li P., Yang F., Yang B., Wang L. IoT-enhanced smart road infrastructure systems for comprehensive real-time monitoring. Internet of Things and Cyber-Physical Systems, 4, 235–249, 2024.

[3] Finogeev A., Finogeev A., Fionova L., Lyapin A., Lychagin K. A. Intelligent monitoring system for smart road environment. Journal of Industrial Information Integration, in press, 2019.

[4] Torralba A., García-Martín J. P., González-Romo J. M., García-Castellano M., Peral-López J., Pérez-Mira V. An Autonomous, Intelligent Sign Control System Using Wireless Communication and LED Signs for Rural and Suburban Roads. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 14(2), 115–128, 2022. doi: 10.1109/MITS.2021.3049375.

[5] Kunst R., Avila L., Pignaton E., Bampi S., Rochol J. Improving Network Resources Allocation in Smart Cities Video Surveillance. Computer Networks, 2018. doi: 10.1016/j.comnet.2018.01.042.

[6] Al-Hamadi H., Saoud M., Chen I.-R., Cho J.-H. Optimizing the Lifetime of IoT-Based Star and Mesh Networks. IEEE Access, 8, 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2983873.

[7] Kaiwartya O., Abdullah A. H., Cao Y., Lloret J., Kumar S., Shah R. R., Prasad M., Prakash S. Virtualization in Wireless Sensor Networks: Fault Tolerant Embedding for Internet of Things. IEEE Internet of Things Journal, 5(2), 571–580, 2018. doi: 10.1109/JIOT.2017.2717704.

[8] Park S. Spatial Optimization of the Multi-Sensor Mesh Network Problem for Smart City: Multi-Functional Smart Pole Locations in Seoul. Master's Thesis, Seoul National University, 2024.

[9] Park S., Lee G. Spatial Optimization of the Multiple Coverage Mesh Network Problem for Multifunctional Smart Poles. Geographical Analysis, 2025.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

НАДЕЖДНО СЪБИРАНЕ НА ДАННИ ОТ ПЪТНИ СЕНЗОРИ

RELIABLE DATA COLLECTION FROM ROAD SENSORS

Radoslav Furnadzhiev, Mitko Shopov, Maria Babanova
1) Technical University of Sofia, Faculty of Electronics and Automation, Department of Computer Systems and Technologies, Plovdiv, Bulgaria
2) Center of Competence "Smart Mechatronic, Eco-and Energy-Saving Systems and Technologies", 4000 Plovdiv, Bulgaria

Abstract
Intelligent Transportation Systems (ITS) increasingly depend on dense networks of road sensors whose measurements feed traffic management, pavement assessment, and safety applications. The value of these applications is bound by the reliability of the underlying data: sensor faults, environmental noise, intermittent wireless links, node mobility, and malicious interference all degrade the quality of the collected information. This paper surveys and synthesises the mechanisms that make data collection from road sensors reliable, drawing on recent literature spanning sensor infrastructure, multi-sensor data fusion, fault-tolerant networking, distributed fog/edge processing, and distributed-ledger integrity protection. We organise the field around four reliability layers: the sensing layer, the fusion layer, the network and processing layer, and the trust layer and show how techniques at each layer complement one another. Distributed data fusion based on the theory of belief functions, executed through self-stabilising algorithms, tolerates unreliable sources and network failures; fault-tolerant virtual network embedding and hierarchical fog computing preserve data continuity under node and link failures; and lightweight distributed-ledger technologies secure the integrity and provenance of vehicular data. No single mechanism is sufficient in isolation; reliable road-sensor data collection requires their coordinated combination. The paper consolidates design guidelines for laboratory C4.1 of the Center of Competence "Smart Mechatronic, Eco-and Energy-Saving Systems and Technologies".

Keywords: road sensors, reliable data collection, data fusion, belief functions, fault tolerance, fog computing, edge computing, intelligent transportation systems, data integrity.

1. INTRODUCTION

Road infrastructure is one of the most heavily instrumented environments of the modern smart city. Intelligent Transportation Systems (ITS) embed sensors in the pavement, mount them on roadside gantries and smart poles, and increasingly treat moving vehicles as mobile sensing platforms. The resulting data streams drive traffic-state estimation, incident detection, pavement-condition assessment, adaptive signal control, and driver-assistance services. The usefulness of every one of these applications is, however, bounded by a single property of the data on which it operates: reliability. A congestion estimate computed from a stuck inductive loop, an icy-road warning derived from a miscalibrated thermometer, or a safety message lost to a wireless outage can be worse than no information at all, because it induces misplaced confidence in a wrong decision.

Reliability in the road-sensor context is multi-dimensional. It encompasses the correctness of individual measurements, the continuity of the data flow in the presence of

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

node and link failures, and the integrity and provenance of the data as it traverses an open, frequently wireless, and sometimes adversarial communication medium. These dimensions are attacked by distinct phenomena: sensors drift, age, and fail; the physical environment introduces noise, occlusion, and in the case of vehicular networks extreme mobility; wireless links suffer interference, fading, and congestion; and exposed media invite spoofing, tampering, and denial-of-service attacks [3, 7].

Because no single technique addresses all of these failure modes, a reliable road-sensor data-collection system is necessarily a layered construction. This paper, prepared within the activities of laboratory C4.1 of the Center of Competence "Smart Mechatronic, Eco-and Energy-Saving Systems and Technologies", surveys the principal mechanisms reported in the recent literature and organises them into the four cooperating: a sensing layer, a fusion layer, a network and processing layer, and a trust layer. Data ascends through the layers from raw, individually unreliable readings at the bottom to trusted, reliable estimates at the top, with each layer countering a distinct class of failure.

Section 2 describes the road-sensor infrastructure and its intrinsic reliability characteristics. Section 3 analyses the sources of unreliability. Section 4 examines multi-sensor data fusion as the primary means of extracting reliable estimates from imperfect sources. Section 5 reviews fault-tolerant networking and distributed fog/edge processing, which preserve data continuity. Section 6 considers data integrity and trust through distributed-ledger technologies. Section 7 discusses the findings and Section 8 concludes.

2. ROAD SENSOR INFRASTRUCTURE

The starting point for reliable data collection is the sensing layer itself. In their paper the authors [1] provide a comprehensive taxonomy of the IoT sensor systems used to monitor road infrastructure, dividing them into two broad classes according to their relationship with the pavement.

Intrusive sensors are installed on or within the pavement surface. The class includes inductive loop detectors, magnetometers, and piezoelectric sensors. Piezoelectric elements generate an electrical impulse when mechanically stressed by a passing axle, enabling vehicle classification, weigh-in-motion, and speed estimation [1]. Intrusive sensors deliver accurate, low-latency measurements but are costly to install and maintain because deployment and replacement require interrupting traffic and cutting into the road surface, an operation that itself shortens pavement service life. Their physical exposure also makes them a frequent source of faults, which directly motivates the reliability mechanisms discussed in later sections.

Non-intrusive sensors observe the road from a distance and include acoustic sensors, radar, LiDAR, passive infrared sensors, and camera systems [1]. Cameras provide the richest semantic data and can even be combined for example, two co-located cameras used for stereovision act as a virtual sensor that transforms image pixels into spatial voxels for distance measurement [1]. The price of this richness is high bandwidth and sensitivity to illumination and weather, which translate into data-quality variability that downstream fusion must absorb.

A defining feature of the modern road-sensor stack is that processing is distributed across the edge, fog, and cloud layers [1, 6]. The authors [1] distinguish edge computing, which runs on edge devices such as single-board computers close to the sensor, from fog computing, in which more capable devices exercise decentralised control and perform complex analysis over a group of edge devices in the same local network, reserving the centralised cloud for heavy, latency-tolerant analytics. In their work the authors [6] surveyed precisely this intersection of ITS sensing and edge computing, arguing that moving computation toward the sensor is essential to meet the

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

latency, bandwidth, and critically for this paper reliability requirements of ITS, because local processing reduces the volume of data exposed to the unreliable wide-area links and shortens the control loop for time-critical reactions.

3. SOURCES OF UNRELIABILITY

Before reliability mechanisms can be designed, the failure modes they counter must be made explicit. Four recurring sources of unreliability emerge from the literature.

Source-level imperfection. Individual sensors produce low-quality, redundant, or simply erroneous readings due to calibration drift, ageing, environmental interference, and outright hardware failure. The elimination of low-quality, redundant, and conflicting data as a critical task of data-fusion preprocessing, confirming that imperfect sources are the rule rather than the exception [2] . Different studies [3] frame the same problem as the "data source inaccuracy and unreliability problem", noting that classical fusion assumes homogeneous, reliable sources giving similar readings an assumption that road environments routinely violate.

Network-level failure. Wireless links between sensors, roadside units, and gateways suffer interference, fading, congestion, and topology changes. In vehicular ad hoc networks the situation is aggravated by high mobility, which causes frequent route breakage and message loss [7]. A reliable system must therefore tolerate not only bad data but a network that intermittently fails to deliver good data [3].

Node and embedding failure. In a wireless sensor network the failure of a relay node or the depletion of its battery can sever the only path between a source and the gateway. In their study the authors [4] treat this as a virtual-network-embedding problem in which the survival of at least one source-to-destination path after a failure is the quantity to be maximised.

Adversarial interference. Because vehicles and roadside units communicate over unrestrained, exposed wireless media, they are visible to security threats; data may be intercepted, spoofed, or modified for unauthorised use [7]. Reliability here merges with security: data that cannot be trusted is, for decision-making purposes, unreliable [8, 9].

4. DATA FUSION FOR RELIABLE COLLECTION

The single most effective response to source-level imperfection is multi-sensor data fusion, which combines redundant and complementary observations into an estimate more reliable than any constituent measurement. The authors [2] review data-fusion (DF) methods for real-time, multi-sensor traffic-flow analysis and structure the design of any DF method around four core steps preprocessing, filtering, decision, and evaluation operating at three abstraction levels: data-level fusion, which combines raw readings through noise removal, outlier rejection, and denoising (commonly with a Kalman filter); feature-level fusion, which merges extracted features; and decision-level fusion, which reasons over the outputs of multiple classifiers through inference and selection. This hierarchy is the backbone of reliable estimation, because each level removes a distinct class of error: data-level fusion suppresses noise, feature-level fusion exploits complementarity, and decision-level fusion resolves conflicts between sources.

For decision-level fusion under explicitly unreliable sources, the theory of belief functions (Dempster-Shafer evidence theory) is particularly suitable, as it can represent ignorance and conflict directly. The authors [3] build on it to detect dangerous road events, specifically icy roads from distributed temperature measurements using data from both vehicle on-board sensors and wireless roadside sensors. Their central contribution to reliability is twofold. First, the use of belief functions allows the system to deduce correct conclusions from individually unreliable sources. Second, to cope with network failures, fusion is performed through a self-stabilising distributed algorithm: regardless of transient errors or message loss, the computation

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

converges to a correct global state, preventing a vehicle from converging to an erroneous confidence simply because it missed updates. The combination of independent bodies of evidence is expressed by Dempster's rule of combination,

$$m_{12}(A) = \frac{1}{1-K}\sum_{B\cap C=A} m_1(B)\,m_2(C), \qquad K = \sum_{B\cap C=\varnothing} m_1(B)\,m_2(C), \quad (1)$$

where m_1 and m_2 are the mass functions of two sources, A is a hypothesis over the frame of discernment (e.g. icy / not icy), and K measures the conflict between the sources. A high conflict K flags disagreement and thereby signals a potentially unreliable source, so the fusion operator both produces an estimate and quantifies its trustworthiness. A proposed approach is validated through in-lab and on-the-road experiments, demonstrating that proper results can be deduced from unreliable data in a real vehicular network [3].

5. FAULT-TOLERANT NETWORKING AND PROCESSING

Fusion improves the correctness of estimates, but it cannot help if the data never arrives. Continuity of the data flow is the responsibility of the network and processing layer.

Fault-tolerant embedding [4] addresses resilience at the level of the sensor network itself through virtualisation. They formulate fault-tolerant virtual network embedding (VNE) in wireless sensor networks as a bi-objective optimisation solved with an adapted non-dominated sorting genetic algorithm (A-NSGA) that simultaneously maximises fault tolerance the probability that at least one path between source and destination survives a link failure and minimises communication delay. Crucially, the scheme discovers alternative path endpoints when a node or link fails and supports re-embedding without pre-allocating back-up resources, so reliability is achieved without the energy and capacity cost of permanent redundancy.

Distributed fog processing. Pushing analytics toward the data source improves both latency and reliability by reducing dependence on a single central server. The authors [5] propose a hierarchically distributed fog-computing architecture for real-time anomaly detection in smart-meter sensor data; although demonstrated in the smart-grid domain, the architecture transfers directly to road sensing. Machine-learning anomaly-detection models are trained and then executed across intermediate fog nodes rather than in the cloud, overcoming the volume, velocity, bandwidth, and real-time limitations that make a purely cloud-centric pipeline brittle. The same paper notes that reliability is further strengthened by majority voting across three or more nodes when flagging anomalies, a decision-level redundancy mechanism that prevents a single faulty detector from corrupting the result. This hierarchical edge-fog-cloud organisation mirrors the processing model identified in the sensor-infrastructure survey [1, 6] and confirms its generality.

Resilient routing. At the vehicular-network level, it is proposed [7] a resilient and secure cooperative ITS (RS-ITS) that uses the roadside unit as an intelligent agent employing machine learning to predict the best routes and maintain low overhead, while securing the network against vulnerabilities and ensuring reliable propagation of messages between vehicles and RSUs. Their simulations report improvements over comparable schemes of 17% in delivery ratio, 40% in data delay, 22% in energy consumption, 17% in route discontinuity, 27% in network overhead, and 43% in resistance to malicious attacks quantifying how route reliability and security can be improved jointly rather than traded off.

6. DATA INTEGRITY AND TRUST

The final layer concerns whether collected data can be trusted once it has been delivered. In the open vehicular environment, where the Internet of Vehicles (IoV) interconnects every

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

sensor and actuator, integrity, provenance, and trustworthiness of the data become reliability requirements in their own right [8, 9]. Distributed-ledger technology (DLT) has emerged as the dominant answer.

The authors [8] propose Lightweight-BIoV, a blockchain distributed-ledger scheme for the Internet of Vehicles that addresses the resource constraints of vehicular nodes while providing data integrity, exchange reliability, provenance, and trust for node transactions and communications. The "lightweight" design is essential, because the heavy consensus of general-purpose blockchains is incompatible with the latency and energy budgets of road sensors.

Other studies [9] pursue the same goal at the architectural level with FlexiChain 3.0, a DLT-based Layer-0 network designed specifically for the ITS-IoV setting after an analysis of consensus algorithms and their applicability. They report a throughput of 2.3 transactions per second shown to be acceptable for IoV together with a security level that is largely independent of the number of participating nodes, demonstrating that strong integrity guarantees can be delivered within the timing constraints of fast-moving vehicles.

7. DISCUSSION

The reviewed literature shows that reliable data collection from road sensors is not the property of any single component but an emergent property of cooperating layers. Table 1 summarises the principal mechanisms, the failure mode each one targets, and the representative works.

Reliability layer	Primary mechanism	Failure mode addressed	Ref.
ReferenceSensing	Redundant intrusive / non-intrusive sensors; edge pre-processing	Source imperfection, sensor faults	[1], [6]
Fusion	Belief-function fusion; multi-level DF; self-stabilising algorithms	Unreliable / conflicting sources	[2], [3]
Network & processing	Fault-tolerant VNE; hierarchical fog; resilient ML routing	Node / link / network failure	[4], [5], [7]
Trust	Lightweight distributed-ledger technology	Tampering, spoofing, lost provenance	[8], [9]

Table 1. Layered mechanisms for reliable data collection from road sensors.

Three cross-cutting observations follow. First, redundancy is the common currency of reliability, but it appears in different forms at each layer: spatial redundancy of sensors and fusion at the sensing and fusion layers [2, 3], path redundancy at the network layer [4], and decision redundancy through majority voting at the processing layer [5]. Effective design allocates redundancy where it is cheapest for the dominant failure mode rather than uniformly. Second, reliability and energy are in tension: every redundant sensor, path, or ledger transaction consumes energy, so mechanisms such as adaptive embedding without pre-allocated back-ups [4] and lightweight consensus [8, 9] explicitly seek reliability at minimum cost, a concern of particular relevance to the energy-saving mandate of the Center of Competence. Third, reliability and security converge in the vehicular setting: distributed fusion that detects inconsistent sources [3] and resilient routing that resists malicious attacks [7] protect data correctness

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

and authenticity at the same time, and the trust layer [8, 9] makes this convergence explicit.

The layers are also complementary in time. Belief-function fusion with self-stabilisation [3] and fog-level anomaly detection [5] act in the millisecond-to-second range to keep time-critical reactions correct, while ledger-based integrity protection [8, 9] operates over longer horizons to guarantee auditability and provenance. A complete road-sensor system therefore composes mechanisms across both layers and timescales.

8. CONCLUSION

This paper has surveyed the mechanisms that make data collection from road sensors reliable and has organised them into four cooperating layers: sensing, fusion, network and processing, and trust synthesising findings from nine recent works. At the sensing layer, a taxonomy of intrusive and non-intrusive sensors with edge pre-processing supplies redundant, complementary observations. At the fusion layer, multi-level data fusion and, in particular, belief-function fusion executed through self-stabilising distributed algorithms extract correct estimates from individually unreliable sources while quantifying conflict. At the network and processing layer, fault-tolerant virtual network embedding, hierarchical fog computing with majority voting, and machine-learning-based resilient routing preserve data continuity under node, link, and network failures. At the trust layer, lightweight distributed-ledger technologies secure the integrity and provenance of vehicular data within strict timing budgets.

The central conclusion is that no single technique suffices: reliable road-sensor data collection emerges only from the coordinated combination of mechanisms, with redundancy as the common currency and energy efficiency and security as the cross-cutting constraints. Future work in laboratory C4.1 will instantiate this layered model on a physical road-sensor testbed, integrating belief-function fusion with a fault-tolerant fog architecture, and will experimentally characterise the reliability-energy trade-off identified throughout this review.

ACKNOWLEDGEMENTS

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

REFERENCES

[1] Micko K., Papcun P., Zolotova I. Review of IoT Sensor Systems Used for Monitoring the Road Infrastructure. Sensors, 23(9), 4469, 2023. doi:10.3390/s23094469. Available at: https://www.mdpi.com/1424-8220/23/9/4469.

[2] Kashinath S. A., Mostafa S. A., Mustapha A., Mahdin H., Lim D., Mahmoud M. A., Mohammed M. A., Al-Rimy B. A. S., Fudzee M. F. M., Yang T. J.
Review of Data Fusion Methods for Real-Time and Multi-Sensor Traffic Flow Analysis. IEEE Access, 9, 51258–51276, 2021. doi: 10.1109 ACCESS.2021.3069770. Available at: https://ieeexplore.ieee.org/document/9388883.

[3] Radak J., Ducourthial B., Cherfaoui V., Bonnet S. Detecting Road Events Using Distributed Data Fusion: Experimental Evaluation for the Icy Roads Case. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 17(1), 184–194, 2016. doi: 10.1109/TITS.2015.2464707. Available at: https:/ hal.science/hal-01294780.

[4] Kaiwartya O., Abdullah A. H., Cao Y., Lloret J., Kumar S., Shah R. R., Prasad M., Prakash S. Virtualization in Wireless Sensor Networks: Fault Tolerant Embedding for Internet of Things. IEEE Internet of Things Journal, 5(2), 571–580, 2018. doi: 10.1109/JIOT.2017.2717704. Available at: https://ieeexplore.ieee.org/document/7950953.

[5] Jaiswal R., Chakravorty A., Rong C. Distributed Fog Computing Architecture for Real-Time Anomaly Detection in Smart Meter Data. IEEE Sixth

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

International Conference on Big Data Computing Service and Applications (BigDataService), Oxford, UK, 2020, pp. 1–8. doi: 10.1109 BigDataService49289.2020.00009. Available at: https://ieeexplore.ieee.org/document/9103795.
[6] Zhou X., Ke R., Yang H., Liu C. When Intelligent Transportation Systems Sensing Meets Edge Computing: Vision and Challenges. Applied Sciences, 11(20), 9680, 2021. doi: 10.3390/app11209680. Available at: https://www.mdpi.com/2076-3417/11/20/9680.
[7] Rehman A., Haseeb K., Saba T., Lloret J., Ahmed Z. Towards Resilient and Secure Cooperative Behavior of Intelligent Transportation System Using Sensor Technologies. IEEE Sensors Journal, 2023. doi: 10.1109/JSEN.2023.3264304. Available at: https://ieeexplore.ieee.org/document 10093116.
[8] Laghari A. A., Khan A. A., Alkanhel R., Elmannai H., Bourouis S. Lightweight-BIoV: Blockchain Distributed Ledger Technology (BDLT) for Internet of Vehicles (IoVs). Electronics, 12(3), 677, 2023. doi: 10.3390/electronics12030677. Available at: https://www.mdpi.com/2079-9292/12/3/677.
[9] Alkhodair A., Mohanty S. P., Kougianos E. FlexiChain 3.0: Distributed Ledger Technology-Based Intelligent Transportation for Vehicular Digital Asset Exchange in Smart Cities. Sensors, 23(8), 4114, 2023. doi: 10.3390/s23084114. Available at: https://www.mdpi.com/1424-8220/23/8/4114.

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

Съфинансирано от Европейския съюз
Изпълнителна агенция „Програма за образование“
ПРОГРАМА НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ИНОВАЦИИ И ДИГИТАЛИЗАЦИЯ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „МЕХАТРОНИКА, ЕКО И ЕНЕРГОСПЕСТЯВАЩИ СИСТЕМИ И ТЕХНОЛОГИИ“ - ПЛОВДИВ' 2026

НАУЧНОИЗСЛЕДОВАТЕЛСКА И ПРИЛОЖНА ЛАБОРАТОРНА КОНФИГУРАЦИЯ СЪС СПЕЦИАЛИЗИРАНИ ЗАДВИЖВАНИЯ

HYBRID RESEARCH AND APPLICATION-ORIENTED LABORATORY FRAMEWORK FOR THE DEVELOPMENT, ANALYSIS, AND CONTROL OF SPECIALIZED ELECTRIC DRIVE SYSTEMS

Tihomir Stoyanov[1,2,a], Sevil Ahmed-Shieva[1,2,b], Nikola Shakev[1,2,c]

[1]Faculty of Electronics and Automation, Technical University of Sofia, Plovdiv Branch
[2]Center of Competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"

a) stoyanov.tihomir@tu-plovdiv.bg; b) sevil.ahmed@tu-plovdiv.bg; c) shakev@tu-plovdiv.bg;

Abstract
The design of modern electric drives, with an emphasis on their control methods, constitutes a complex, multi-layered, and intellectually demanding process that requires collaborative work among specialists from various domains of control engineering and scientific disciplines. In particular, the design and synthesis of control strategies for power electronic converters are emerging as key factors that will enable meeting the requirements of industrial automation—from power supply sources to comprehensive multi-coordinate control of electric drives. The research and applied objectives established within Project Center of Competence Project "Smart Mechatronic, Eco- and Energy-Saving Systems and Technologies", BG05M2OP001-1.002-0023, are closely aligned with current industrial challenges. These objectives are directed toward identifying solutions for improving the efficiency and accuracy of robotic systems. The present report introduces a research laboratory configuration for vector control of induction motors, as well as a servo drive system based on a synchronous motor, incorporating industrial communication protocols.

Keywords: ключова дума на английски език; ключова дума на английски език.

ВЪВЕДЕНИЕ

През последните години непрекъснато се увеличава кръгът от функционални изисквания, предявявани към автоматизираните системи за електромеханично преобразуване на енергията (Електрозадвижвания - ЕЗ) в индустрията, транспорта и специалното оборудване, повишават се изискванията към динамичните им характеристики и икономия на енергия, засилва се необходимостта от изграждане на алгоритмично програмно осигуряване, което по един или друг критерий може да бъде наречено „интелигентно” [1]. Понастоящем синтезът на управляващи алгоритми е задача на съвременната теория на автоматичното управление на ЕЗ. Бурното развитие на изкуствения интелект допринася за промяна в тази установена методологична основа. Състоянието на съвременната силова техника и информационна технология вече позволява реализирането на елементи на „интелигентност” (Intelligent Control) даже в сравнително евтини серийни системи за автоматично управление на ЕЗ (САУЕЗ, СУЕЗ). За това допринасят раз-

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

ширяващите се възможности на апаратните части (хардуера), които включват и модули/функционалности с добавен изкуствен интелект.

НАУЧНОПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ЦЕЛИ

Проектирането на модерни електрозадвижвания с фокус методи за тяхното управление е сложен, многопластов и труден интелектуален процес, който изисква работа в екип на специалисти от различни области на управлението и научни направления. А проектирането и синтезът на управление на силовите преобразуватели се очертават като ключови фактори, които ще позволят да бъдат посрещани изискванията на индустриалната автоматизация - от захранващите източници до комплексно управление на координатите на ЕЗ [2].

Научноизследователските и приложни цели поставени в рамките на Проект Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“, BG05M2OP001-1.002-0023 са свързани с актуални за индустрията задачи. Те са насочени към търсене на решения за подобряване ефективността, точността на робототехническите системи и могат да бъдат обобщени както следва:

- *Разработване и изследване на структури на системи за управление на електрозадвижвания (ЕЗ) с приложение в робототехническите системи. Синтез на позициониращи – следящи системи.*
- *Разработка на нови алгоритми за интелигентно управление на захващащи механизми с използване на подходи от изкуствения интелект (размита логика и невронни мрежи).*
- *Разработка и внедряване на структури на системи за прецизно позициониране с приложение в робототехническите системи (вкл. и при мобилни роботи).*

На база експертиза и предишен опит колективът по работния пакет със заложените цели прилага подходи от Теория на автоматичното управление, Оптимално управление, Управление на електрозадвижвания, Индустриални информационни системи, Компютърно зрение, Адаптивно и интелигентно управление.

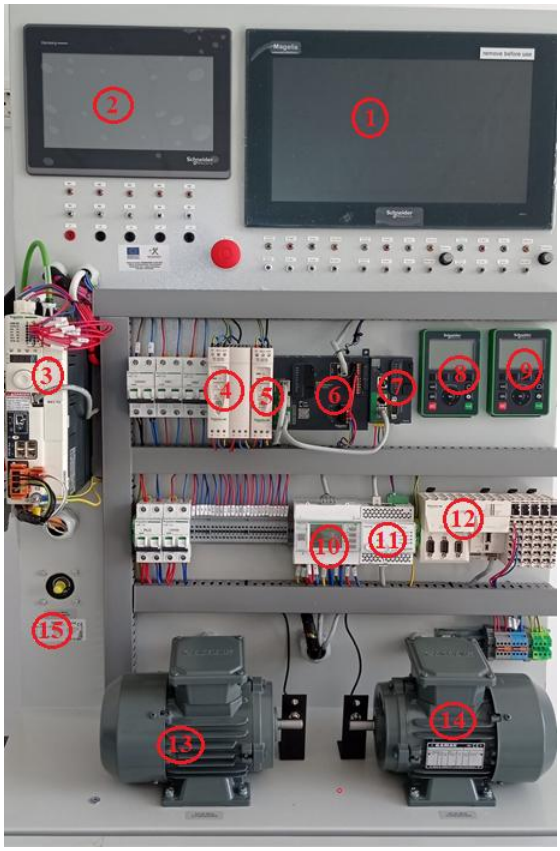
След първоначалните изследвания върху математични и симулационни модели на цялостни робототехнически системи и/или техни отделни модули (напр. задвижвания), представени в [3-7], усилията се насочват към тяхното внедряване и изследване в реална (лабораторна) среда.

Настоящият доклад представя научноизследователска лабораторна конфигурация за векторно управление на асинхронни двигатели и сервозадвижване със синхронен двигател и индустриални протоколи за комуникация (CANOpen, Modbus, Ethernet).

Научноизследователският лабораторен стенд (Фиг. 1.) се състои от:

- *Трифазен асинхронен електродвигател - GAMAK AGM 71 4b(13,14);*
- *Серво мотор – BSH0551T11A2A(15);*
- *Сервозадвижване - LXM32A(3);*
- *Захранващ блок - Modicon 24V/5A(4);*
- *Честотен преобразувател - ATV930;*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие



***Фиг. 1**. Научноизследователски лабораторен стенд.*

- *Честотен преобразувател - ATV630;*
- *Програмируем логически контролер - Modicon M251(7);*
- *Програмируем логически контролер - Modicon M262(6);*
- *Контролер - Modicon LMC058(12);*
- *Ethernet gateway - EcoStruxure Link150(11);*
- *Ethernet TCP/IP switch – ConneXium*
- *Електромер - PowerLogic PM3000(10);*
- *15" сензорен дисплей - Harmony Modular iPC(1);*
- *10" сензорен дисплей - Harmony ST6(2);*
- *Графичен дисплей/терминал(8,9);*
- *Захранващ блок - Modicon 24V/3A(5).*

Стендът позволява изследване на заложените цели и постиганите теоретични и симулационни изследвания. Наличието на съвременни комуникационни протоколи и модул „електромер“ улесняват прилагането на оптимизационни решения свързани с енергийната ефективност.

ТЕХНИЧЕСКА СПЕЦИФИКАЦИЯ НА ОТДЕЛНИТЕ МОДУЛИ

1. Трифазен асинхронен електродвигател - GAMAK AGM 71 4b.

Трифазните асинхронни двигатели - GAMAK AGM 71 4b (Фиг.2) имат следните основни технически данни [8]:

- *Номинална мощност – 0,37, kW;*
- *Номинална скорост – 1390, min-1;*
- *Номинален ток – 1,15, A;*
- *Номинален въртящ момент – 2,54, Nm;*
- *Фактор на мощността (cos ϕ) – 0,68;*
- *Инерционен момент – 0,00054, kgm^2;*
- *КПД – 59.7. %.*

***Фиг. 2**. Трифазен асинхронен електродвигател - GAMAK AGM 71 4b.*

2. Серво мотор – BSH0551T11A2A.

Серво моторът – BSH0551T11A2A (Фиг.3) има следните основни технически данни [9]:

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

- *Максимална механична скорост -9000 rpm;*
- *Непрекъснат въртящ момент при спиране - 0,5 N.m за LXM32.U45M2 при 1,5 A, 230 V, Еднофазно;*
- *Пик на въртящ момент - 1,4 N.m за LXM32.U45M2 при 1,5 A, 230 V, Еднофазно;*
- *Номинална изходна мощност - 300 W за LXM32.U45M2 при 1,5 A, 230 V, Еднофазно;*
- *Номинален въртящ момент - 0,45 N.m за LXM32.U45M2 при 1,5 A, 230 V, Еднофазно.*

***Фиг. 3**. Серво мотор – BSH0551T11A2A.*

3. Сервозадвижване - LXM32A.

Сервозадвижването – LXM32A (Фиг.4) има следните основни технически данни [10]:

- *Брой на фазите на мрежата – Еднофазно;*
- *Номинално захранващо напрежение - 100...120 V - 15...10 %/ 200...240 V - 15...10 %;*
- *граници на захранващото напрежение - 85…132 V/ 170…264 V;*
- *Честота на захранването - 50/60 Hz - 5...5 %;*
- *Продължителен изходен ток - 1,5 A при 8 kHz;*
- *Номинална мощност - 0,15 kW при 115 V 8 kHz/ 0,3 kW при 230 V 8 kHz;*

***Фиг. 4**. Сервозадвижване - LXM32A.*

4. Честотен преобразувател - ATV930.

Трифазният честотен преобразувател ATV930 (Фиг.5) има следните основни технически данни [4]:

- *Номинално захранващо напрежение - 380..480 V - 15...10 %;*
- *Номинален изходен ток – 2,2 A;*
- *Номинална мощност - 0,75 kW за нормален режим на робота;*
- *Поддържани комуникационни протоколи - Modbus TCP, EtherNet/IP;*

***Фиг. 5**. Честотен преобразувател - ATV930.*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

5. Честотен преобразувател – ATV630.

Трифазният честотен преобразувател ATV930 (Фиг.6) има следните основни технически данни [5];

- *Номинално захранващо напрежение - 380..480 V - 15...10 %;*
- *Номинален изходен ток – 2,2 A;*
- *Номинална мощност - 0,75 kW за нормален режим на робота;*
- *Поддържани комуникационни протоколи - Modbus TCP, EtherNet/IP;*

***Фиг. 6**. Честотен преобразувател – ATV630.*

6. Програмируем логически контролер - Modicon M251.

Програмируемият логически контролер Modicon M251 (Фиг.7) в конфигурацията на стенда е с със следните основни технически данни [6]:

- *номинално захранващо напрежение – 24, V DC;*
- *Пусков ток – 50 A;*
- *Тип интегрирана връзка - USB порт с mini B USB 2.0, Не изолирана серийна връзка Serial с RJ45 и RS232/RS485, Dual-port Ethernet с RJ45, CANopen J1939 с SUB-D 9;*
- *Протокол на комуникационния порт - USB порт USB - SoMachine-Network, Не изолирана серийна връзка Modbus главен/подчинен - RTU/ASCII or SoMachine-Network;*
- *Порт Ethernet - Ethernet 10BASE-T/100BASE-TX - 2 Медни кабели;*

***Фиг. 7**. Програмируем логически контролер - Modicon M251.*

7. Програмируем логически контролер - Modicon M262.

Програмируем логически контролер - Modicon M262 (Фиг.8) има следните основни технически данни [7]:

- *номинално захранващо напрежение – 24, V DC;*
- *Пусков ток – 40 A;*
- *Тип интегрирана връзка - Ethernet 1 с RJ45 и 10/100BASE-T, Ethernet 2 с 2 RJ45 и 100/1000BASE-T, Serial link с RJ45 и RS232/RS485, Smart Communication Bus, TM3 IO bus;*
- *Протокол на комуникационния порт - EtherNet/IP adapter, EtherNet/IP scanner, Modbus TCP клиент/сървър, Modbus TCP IO scanner, Modbus TCP NVL, Ethernet RSTP, Modbus SL клиент/сървър, Modbus SL IO scanner, Modbus SL modem management, Machine Expert, ASCII manager, ASCII modem management.*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

***Фиг. 8**. Програмируем логически контролер - Modicon M262.*

8. Контролер - Modicon LMC058.

Контролерът за координиран, синхронизиран и интерполиран контрол на движението - Modicon LMC058 (Фиг.9) има следните основни технически данни [8]:

- *номинално захранващо напрежение – 24, V DC;*
- *Тип интегрирана връзка - 1 isolated serial link с female RJ45 Modbus с главен/подчинен RTU/ASCII or character mode ASCII RS232/RS485 300...115200 bps, 1 CAN port с male SUB-D 9 CANmotion bus or CANopen с master, 1 CAN port с male SUB-D 9 CANopen с master, 1 encoder с female SUB-D 15, 1 isolated serial link с female RJ45 Ethernet Modbus TCP/IP с подчинен 10BASE-T/100BASE-TX, 1 isolated serial link с мини B USB 480 Mbit/s, 1 isolated serial link с USB type A 480 Mbit/s*

***Фиг. 9**. Контролер - Modicon LMC058.*

9. Ethernet gateway - EcoStruxure Link150.

Link150 gateway (Фиг.10) осигурява бърза и надеждна Ethernet връзка в най-взискателните приложения, от една сграда до няколко предприятия на различни места. Този gateway поддържа измервателни уреди за мощност и енергия, монитори за кръгове, защитни релета, задействащи устройства, моторни контроли и други устройства, които трябва да комуникират бързо и ефективно данните[9].

***Фиг. 10**. Ethernet gateway - EcoStruxure Link150.*

10. Електромер - PowerLogic PM3000.

Измервателният уред - PowerLogic PM3000 (Фиг.11), осигурява клас на точност 0.5S съгласно стандарта IEC 62053-22 и 32 проби на цикъл. Уредът измерва енергията, активната и реактивната мощност, напрежението, тока, честотата, коефициента на мощността, видимата мощност, общото хармонично изкривяване и до 15-ия хармоник[10]. Уредът има следните основни технически данни:

- *Захранващо напрежение – 100 - 277 VAC, 173 - 480 VAC, 100 - 300 VDC;*
- *Честота – 50 - 60 Hz;*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

- *Номинален ток на линията – 1 А или 5 А;*
- *Диапазон на директно измерване - 50 - 570 VAC;*
- *Диапазон на измерваното напрежение между фазите – 80 - 570 VAC при 45 - 65 Hz;*
  - *Диапазон на измерване между фаза и нула - 50 - 330 VAC при 45 - 65 Hz;*
- *Поддържани комуникационни протоколи - Modbus RTU и ASCII 2.*

***Фиг. 11**. Електромер - PowerLogic PM3000.*

11. Захранващ блок Modicon, 24V/5A.

Захранващият блок Modicon, 24V/5A (Фиг.12) има следните основни технически данни [11]:

- *Номинално входно напрежение – 100 - 240 V AC междуфазово, терминал(и): L1-L2, 100 - 240 V AC Еднофазно, терминал(и): N-L1, 110-220 V DC;*
- *Номинална мощност – 120 W;*
- *Изходно напрежение – 24 V DC;*
- *Изходен ток – 5 А.*

***Фиг. 12**. Захранващ блок Modicon, 24V/5A.*

12. Захранващ блок Modicon, 24V/3A.

Захранващият блок Modicon, 24V/3A (фиг.13) има следните основни технически данни[12]:

- *Номинално входно напрежение – 100 - 240 V AC междуфазово, терминал(и): L1-L2, 100 - 240 V AC Еднофазно, терминал(и): N-L1, 110-220 V DC;*
- *Номинална мощност – 72 W;*
- *Изходно напрежение – 24 V DC;*
- *Изходен ток – 3 А.*

***Фиг. 13**. Захранващ блок Modicon, 24V/3A.*

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

10" сензорен дисплей - Harmony ST6.

Сензорният дисплей - Harmony ST6 (Фиг.14) има следните основни технически данни [13]:

- *Процесор - ARM Cortex-A8;*
- *Тип дисплей - Цветен TFT LCD;*
- *16 милиона цвята;*
- *Разделителна способност - 1024 x 600 пиксела WSVGA;*
- *Номинално захранващо напрежение - 24 V DC (+/- 20 %);*
- *Мощност - 12,6 W.*

***Фиг. 14**. 10" сензорен дисплей - Harmony ST6.*

13. 15" сензорен дисплей - Harmony Modular iPC.

Сензорният дисплей - Harmony Modular iPC (Фиг.15) има следните основни технически данни [14]:

- *Тип дисплей - Цветен TFT LCD, LED;*
- *16 милиона цвята;*
- *Разделителна способност - 1366 x 768 pixels WHD FWXGA;*
- *Номинално захранващо напрежение - 24 V DC, 100 - 240 V AC;*

***Фиг. 15**. 15" сензорен дисплей - Harmony Modular iPC.*

14. Графичен дисплей/терминал.

Графичните терминали (Фиг.16) се използват за:

- *управление, настройка и конфигуриране на задвижването;*
- *за запазване и изтегляне на конфигурации;*
- *за показване на текущите стойности с използване на честотните преобразуватели - ATV630 и ATV930 [15].*

***Фиг. 16**. Графичен дисплей/терминал.*

15. Ethernet TCP/IP switch – ConneXium.

За осигуряване на комуникацията между различните компоненти от системата се използва - Ethernet TCP/IP switch –

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

ConneXium (Фиг.17) имащ следните основни технически данни [16]:

- *Номинално захранващо напрежение – 12 - 24 V;*
- *Консумация на енергия - 2,2 W;*
- *Порт Ethernet - 10/100BASE-TX - 5 Медни кабели;*
- *Протокол на комуникационния порт - Ethernet TCP/IP;*
- *Тип интегрирана връзка - Shielded RJ45 Медни кабели.*

Фиг. 17*. Ethernet TCP/IP switch – ConneXium.*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представената научноизследователска апаратура осигурява възможност за редица изследвания, свързани с разработването на методи и алгоритми за интелигентно управление на движението на мехатронни механизми и робототехнически системи.

Предвидени конкретни изследвания и разработки са:

- разработване на нови методи и съвременни технологии за управление на специални ЕЗ за различни изпълнителни механизми (актуатори) с цел повишаване и постигане на ново качеството на движението на координатите;

- събиране и изпращане на данни (Cloud data collection) към центровете за данни с цел постигане на ефективна поддръжка на оборудването и елиминиране на потребността от прекъсване на работата на производствените механизми и агрегати. Отдаленият достъп и статистическите данни ще позволяват на фирмите сигурно и ефективно да управляват, поддържат и подобряват системите за ЕЗ дистанционно. В случай на грешка или повреда системите за управление ще могат да бъдат отдалечено диагностицирани и в повечето случаи – проблемът да бъде отстранен;

- провеждане на изследвания със съвременните индустриални системи за управление на движенията, свързани с оценка и подобряване на поведението на тези системи в нови и непознати среди и обкръжение с цел постигане на функционална пълнота на поведението.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ivan Kostov, Sevil Ahmed, Ivanka Dimitrova, Laboratory of Special Electric Drives in Robotics - Current State, Research Directions and Perspectives, Proceedings of International Scientific Conference „Mechatronic, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies“ 2023, pp. 25-32

[2] Mattia Rossi, Nicola Toscani, Marco Mauri, Francesco Castelli Dezza. Introduction to Microcontroller Programming for Power Electronics Control Applications: Coding With Matlab® And Simulink®, CRC Press; 1st Edition (30 September 2021), ISBN-10:

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

0367709856, ISBN-13: 978-0367709853, pp. 430

[3] Ivan Kostov, Tuning of Control Loops of Electric Drives in Mechatronic Systems, Journal of the Technical University - Sofia, Plovdiv branch, “Fundamental Sciences and Applications”, Vol. 26, 2020, Online ISSN 2603-459X.

[4] Ivan Kostov, Nikola Shakev, Application of Texas Instruments Controllers for Electric Drives Control, Journal of the Technical University - Sofia Plovdiv branch, Bulgaria “Fundamental Sciences and Applications”, pp. 12, Online ISSN 2603-459X

[5] Ivan Kostov, Tuning of cascade electric drive with current, speed, and position loops control. An example, 10th International Scientific Conference “TechSys 2021” – Engineering, Technologies and Systems/AIP Conf. Proc. 2449, 020015-1–020015-6; Published by AIP Publishing. 978-0-7354-4397-6/$30.00, pp. 6, https://doi.org/10.1063/5.0091129

[6] Kostov, I. J, Ahmed, S. A, Dimitrova, I. D, Comparative study of selected speed estimation methods for asynchronous electric drives, TechSys 2024 – Engineering, Technologies and Systems, IP Conference Proceedings, vol. 3078, 2024, https://doi.org/10.1063/5.0208979

[7] Penev, B.G. Some New Geometric State-Space Properties of the Classical Linear Time-Optimal Control Problem with One Input and Real Non-Positive Eigenvalues of the System Following from Pontryagin’s Maximum Principle. Axioms 2025, 14, 97. https://doi.org/10.3390/axioms14020097

[8] https://eldvigateli.com/images/pdf/Gamak-%D0%9A%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3.pdf

[9] https://www.se.com/bg/bg/product/BSH0551T11A2A/ac-%D1%81%D0%B5%D1%80%D0%B2%D0%BE-%D0%B4%D0%B2%D0%B8%D0%B3%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB-bsh-0-5-n-m-8000-rpm-%D1%81-%D1%88%D0%BF%D0%BE%D0%BD%D0%BA%D0%B0-%D0%B1%D0%B5%D0%B7-%D1%81%D0%BF%D0%B8%D1%80%D0%B0%D1%87%D0%BA%D0%B0-ip50/

[10] https://www.se.com/bg/bg/product/LXM32MU45M2/lxm32a-%D1%81%D0%B5%D1%80%D0%B2%D0%BE%D0%B7%D0%B0%D0%B4%D0%B2%D0%B8%D0%B6%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B5-can-rj45-45a-rms-1ph/

[11] https://www.go2se.com/ref=ATV930U07N4/sn=4022200HL203208018/

[12] https://www.go2se.com/ref=ATV630U07N4/sn=4004000HL20372201L/

[13] https://www.se.com/bg/bg/product/TM251MESC/%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D1%80-m251-ethernet-can/

[14] https://www.se.com/bg/bg/product/TM262L10MESE8T/%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D1%80-modicon-m262-5ns-%D0%B8%D0%BD%D1%81%D1%82%D1%80%D1%83%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F-ethernet/

[15] https://www.se.com/bg/bg/product/LMC058LF42/%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%BD%D0%B0-%D0%BE%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B0-42-i-o-24-v-dc-%D0%B7%D0%B0%D1%85%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B5/

[16] https://www.se.com/bg/bg/product-range/63423-ecostruxure-link150/?uniqueCacheKey=v1#overview

[17] https://www.se.com/bg/bg/product/METSEPM3255/%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%80-%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%B8-i-in-u-v-pqs-e-pf-hz-thd-%D1%81%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%B5%D0%BD-%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%82-%D0%BF%D0%B0%D0%BC%D0%B5%D1%82/

[18] https://www.se.com/bg/bg/product/ABL8REM24050/%D0%B7%D0%B0%D1%85%D1%

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

80%D0%B0%D0%BD%D0%B2%D0%B0%D1%89-%D0%B1%D0%BB%D0%BE%D0%BA-24v-5a/
[19] https://www.se.com/bg/bg/product/ABL8REM24030/%D0%B7%D0%B0%D1%85%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B2%D0%B0%D1%89-%D0%B1%D0%BB%D0%BE%D0%BA-24v-3a/
[20] https://www.se.com/bg/bg/product/HMIST6500/%D0%BF%D0%B0%D0%BD%D0%B5%D0%BB-%D1%81%D1%8A%D1%81-%D1%81%D0%B5%D0%BD%D0%B7%D0%BE%D1%80%D0%B5%D0%BD-%D0%B5%D0%BA%D1%80%D0%B0%D0%BD-harmony-st6-10w-%D0%B4%D0%B8%D1%81%D0%BF%D0%BB%D0%B5%D0%B9-2com-2ethernet-usb-%D1%85%D0%BE%D1%81%D1%82-%D0%B8-%D1%83%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B9%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE-24-vdc/
[21] https://www.se.com/bg/bg/product/HMIDM7521/flat-screen-harmony-modular-ipc-display-pc-wide-15-multi-touch-for-hmibm/
[22] https://www.se.com/bg/bg/product/VW3A1111/%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%B8%D1%87%D0%B5%D0%BD-%D0%B4%D0%B8%D1%81%D0%BF%D0%BB%D0%B5%D0%B9-ip65-%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BB/
[23] https://www.se.com/bg/bg/product/TCSESU053FN0/ethernet-tcp-ip-switch-connexium-5-ports-%D0%BC%D0%B5%D0%B4/

Този документ е създаден в рамките на Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии", финансиран от Програма „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г. (ПНИИДИТ), съфинансирана от Европейския съюз чрез Европейския фонд за регионално развитие

---------- www.eufunds.bg ----------

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