

**GOCE DELCEV UNIVERSITY, STIP, NORTH MACEDONIA
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING**

ETIMA 2025
THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE
24-25 SEPTEMBER, 2025



**TECHNICAL SCIENCES APPLIED IN ECONOMY,
EDUCATION AND INDUSTRY**



УНИВЕРЗИТЕТ
ГОЦЕ ДЕЛЧЕВ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ
ФАКУЛТЕТ



УНИВЕРЗИТЕТ „ГОЦЕ ДЕЛЧЕВ“, ШТИП
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

GOCE DELCEV UNIVERSITY, STIP
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING

ТРЕТА МЕЃУНАРОДНА КОНФЕРЕНЦИЈА
THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE

ЕТИМА / ETIMA 2025

ЗБОРНИК НА ТРУДОВИ
CONFERENCE PROCEEDINGS

24-25 септември 2025 | 24-25 September 2025

ISBN: 978-608-277-128-1

DOI: <https://www.doi.org/10.46763/ETIMA2531>

Главен и одговорен уредник / Editor in Chief

проф.д-р Сашо Гелев
Prof.d-r Saso Gelev

Јазично уредување / Language Editor

Весна Ристова (македонски) / Vesna Ristova (Macedonian)

Техничко уредување / Technical Editing

Дарко Богатинов / Darko Bogatinov

Издавач / Publisher

Универзитет „Гоце Делчев“, Штип / Goce Delcev University, Stip
Електротехнички факултет / Faculty of Electrical Engineering

Адреса на организационен комитет / Address of the organizational committee

Универзитет „Гоце Делчев“, Штип / Goce Delcev University, Stip
Електротехнички факултет / Faculty of Electrical Engineering

Адреса: ул. „Крсте Мисирков“ бр. 10А / Address: Krste Misirkov, 10A

Пош. фах 201, Штип - 2000, С. Македонија / PO BOX 201, Stip 2000, North Macedonia

E-mail: conf.etf@ugd.edu.mk

CIP - Каталогизација во публикација

Национална и универзитетска библиотека "Св. Климент Охридски", Скопје

62-049.8(062)

004-049.8(062)

МЕЃУНАРОДНА конференција ЕТИМА (3 ; 2025 ; Штип)

Зборник на трудови [Електронски извор] / Трета меѓународна конференција ЕТИМА 2025, 24-25 септември 2025 ; [главен и одговорен уредник Сашо Гелев] = Conference proceedings / Third international conference, 24-25 September 2025 ; [editor in chief Saso Gelev]. - Текст во PDF формат, содржи 357 стр., илустр. - Штип : Универзитет "Гоце Делчев", Електротехнички факултет ; Штип : "Goce Delchev" University, Faculty of Electrical engineering, 2025

Начин на пристапување (URL): <https://js.ugd.edu.mk/index.php/etima/en>. - Наслов преземен од екранот. - Опис на изворот на ден 30.10.2025. - Трудови на мак. и англ. јазик. - Библиографија кон трудовите

ISBN 978-608-277-128-1

а) Електротехника -- Примена -- Собири б) Машинство -- Примена -- Собири
в) Автоматика -- Примена -- Собири г) Информатика -- Примена -- Собири

COBISS.MK-ID 67297029



Трета меѓународна конференција ЕТИМА
24-25 Септември 2025
Third International Conference ETIMA
24-25 September 2025

**ОРГАНИЗАЦИОНЕН ОДБОР
ORGANIZING COMMITTEE**

Драган Миновски / Dragan Minovski

Електротехнички факултет,
Универзитет „Гоце Делчев“, Штип, Северна Македонија
Faculty of Electrical Engineering,
Goce Delcev University, Stip, North Macedonia

Сашо Гелев / Saso Gelev

Електротехнички факултет,
Универзитет „Гоце Делчев“, Штип, Северна Македонија
Faculty of Electrical Engineering,
Goce Delcev University, Stip, North Macedonia

Тодор Чекеровски / Todor Cekerovski

Електротехнички факултет,
Универзитет „Гоце Делчев“, Штип, Северна Македонија
Faculty of Electrical Engineering,
Goce Delcev University, Stip, North Macedonia

Маја Кукушева Панева / Maja Kukuseva Paneva

Електротехнички факултет,
Универзитет „Гоце Делчев“, Штип, Северна Македонија
Faculty of Electrical Engineering,
Goce Delcev University, Stip, North Macedonia

Билјана Читкушева Димитровска / Biljana Citkuseva Dimitrovska

Електротехнички факултет,
Универзитет „Гоце Делчев“, Штип, Северна Македонија
Faculty of Electrical Engineering,
Goce Delcev University, Stip, North Macedonia

Дарко Богатинов / Darko Bogatinov

Електротехнички факултет,
Универзитет „Гоце Делчев“, Штип, Северна Македонија
Faculty of Electrical Engineering,
Goce Delcev University, Stip, North Macedonia



Трета меѓународна конференција ЕТИМА
24-25 Септември 2025
Third International Conference ETIMA
24-25 September 2025

**ПРОГРАМСКИ И НАУЧЕН ОДБОР
SCIENTIFIC COMMITTEE**

Антонио Курадо / António Curado

Политехнички институт во Виана до Кастело, Португалија
Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Portugal

Стелијан – Емилијан Олтеан / Stelian –Emilian Oltean

Факултет за инженерство и информатичка технологија,
Медицински универзитет Георге Емил Паладе, фармација, наука и технологија
во Таргу Муреш, Романија
Faculty of Engineering and Information Technology, George Emil Palade
University of Medicine, Pharmacy, Science, and Technology of Targu Mures, Romania

Митко Богданоски / Mitko Bogdanoski

Воена академија, Универзитет „Гоце Делчев“, Северна Македонија
Military Academy, Goce Delcev University, North Macedonia

Верица Тасеска Ѓоргиевска / Verica Taseska Gjorgievska

Македонска академија на науките и уметностите, Северна Македонија
Macedonian Academy of Sciences and Arts, North Macedonia

Југослав Ачкоски / Jugoslav Ackoski

Воена академија, Универзитет „Гоце Делчев“, Северна Македонија
Military Academy, Goce Delcev University, North Macedonia

Димитар Богатинов / Dimitar Bogatinov

Воена академија, Универзитет „Гоце Делчев“, Северна Македонија
Military Academy, Goce Delcev University, North Macedonia

Со Ногучи / So Noguchi

Висока школа за информатички науки и технологии
Универзитет Хокаидо, Јапонија
Graduate School of Information Science and Technology
Hokkaido University, Japan

Диониз Гашпаровски / Dionýz Gašparovský

Факултет за електротехника и информатички технологии,
Словачки Технички Универзитет во Братислава, Словачка
Faculty of Electrical Engineering and Information Technology
Slovak Technical University in Bratislava, Slovakia

Георги Иванов Георгиев / Georgi Ivanov Georgiev
Технички Универзитет во Габрово, Бугарија
Technical University in Gabrovo, Bulgaria

Антон Белан / Anton Belán
Факултет за електротехника и информации технологии
Словачки Технички Универзитет во Братислава, Словачка
Faculty of Electrical Engineering and Information Technology
Slovak Technical University in Bratislava, Slovakia

Ивелина Стефанова Балабанова / Ivelina Stefanova Balabanova
Технички Универзитет во Габрово, Бугарија
Technical University in Gabrovo, Bulgaria

Бојан Димитров Карапeneв / Boyan Dimitrov Karapenev
Технички Универзитет во Габрово, Бугарија
Technical University in Gabrovo, Bulgaria

Сашо Гелев / Saso Gelev
Електротехнички факултет,
Универзитет „Гоце Делчев“, Штип, Северна Македонија
Faculty of Electrical Engineering,
Goce Delcev University, Stip, North Macedonia

Влатко Чингоски / Vlatko Cingoski
Електротехнички факултет,
Универзитет „Гоце Делчев“, Штип, Северна Македонија
Faculty of Electrical Engineering,
Goce Delcev University, Stip, North Macedonia

Божо Крстајиќ / Bozo Krstajic
Електротехнички факултет
Универзитет во Црна Гора, Црна Гора
Faculty of Electrical Engineering,
University in Montenegro, Montenegro

Милован Радуловиќ / Milovan Radulovic
Електротехнички факултет
Универзитет во Црна Гора, Црна Гора
Faculty of Electrical Engineering,
University in Montenegro, Montenegro

Гоце Стефанов / Goce Stefanov
Електротехнички факултет,
Универзитет „Гоце Делчев“, Штип, Северна Македонија
Faculty of Electrical Engineering,
Goce Delcev University, Stip, North Macedonia

Мирјана Периќ / Mirjana Peric
Електронски факултет
Универзитет во Ниш, Србија
Faculty of Electronic Engineering,
University of Nis, Serbia

Ана Вучковиќ / Ana Vuckovic

Електронски факултет,
Универзитет во Ниш, Србија
Faculty of Electronic Engineering,
University of Nis, Serbia

Тодор Чекеровски / Todor Cekerovski

Електротехнички факултет,
Универзитет „Гоце Делчев“, Штип, Северна Македонија
Faculty of Electrical Engineering,
Goce Delcev University, Stip, North Macedonia

Далибор Серафимовски / Dalibor Serafimovski

Електротехнички факултет,
Универзитет „Гоце Делчев“, Штип, Северна Македонија
Faculty of Electrical Engineering,
Goce Delcev University, Stip, North Macedonia

Мирослава Фаркаш Смиткова / Miroslava Farkas Smitková

Факултет за електротехника и информации технологии
Словачки Технички Универзитет во Братислава, Словачка
Faculty of Electrical Engineering and Information Technology
Slovak Technical University in Bratislava, Slovakia

Петер Јанига / Peter Janiga

Факултет за електротехника и информации технологии
Словачки Технички Универзитет во Братислава, Словачка
Faculty of Electrical Engineering and Information Technology
Slovak Technical University in Bratislava, Slovakia

Јана Радичова / Jana Raditschová

Факултет за електротехника и информации технологии
Словачки Технички Универзитет во Братислава, Словачка
Faculty of Electrical Engineering and Information Technology
Slovak Technical University in Bratislava, Slovakia

Драган Миновски / Dragan Minovski

Електротехнички факултет,
Универзитет „Гоце Делчев“, Штип, Северна Македонија
Faculty of Electrical Engineering,
Goce Delcev University, Stip, North Macedonia

Василија Шарац / Vasilija Sarac

Електротехнички факултет,
Универзитет „Гоце Делчев“, Штип, Северна Македонија
Faculty of Electrical Engineering,
Goce Delcev University, Stip, North Macedonia

Александар Тузаров / Aleksandar Tudzarov

Електротехнички факултет,
Универзитет „Гоце Делчев“, Штип, Северна Македонија
Faculty of Electrical Engineering,
Goce Delcev University, Stip, North Macedonia

Владимир Талевски / Vladimir Talevski

Електротехнички факултет,
Универзитет „Гоце Делчев“, Штип, Северна Македонија
Faculty of Electrical Engineering,
Goce Delcev University, Stip, North Macedonia

Владо Гичев / Vlado Gicev

Факултет за информатика,
Универзитет „Гоце Делчев“, Штип, Северна Македонија;
Faculty of Computer Science,
Goce Delcev University, Stip, North Macedonia;

Марија Чекеровска / Marija Cekerovska

Машински факултет,
Универзитет „Гоце Делчев“, Штип, Северна Македонија;
Faculty of Mechanical Engineering,
Goce Delcev University, Stip, North Macedonia;

Мишко Цидров / Misko Dzidrov

Машински факултет,
Универзитет „Гоце Делчев“, Штип, Северна Македонија;
Faculty of Mechanical Engineering,
Goce Delcev University, Stip, North Macedonia;

Александар Крстев / Aleksandar Krstev

Факултет за информатика,
Универзитет „Гоце Делчев“, Штип, Северна Македонија;
Faculty of Computer Science,
Goce Delcev University, Stip, North Macedonia;

Ванчо Аџиски / Vancho Adziski

Факултет за природни и технички науки,
Универзитет „Гоце Делчев“, Штип, Северна Македонија;
Faculty of Natural and Technical Sciences,
Goce Delcev University, Stip, North Macedonia;

Томе Димовски / Tome Dimovski

Факултет за информатички и комуникациски технологии,
Универзитет „Св. Климент Охридски“, Северна Македонија;
Faculty of Information and Communication Technologies,
University St Climent Ohridski, North Macedonia;

Зоран Котевски / Zoran Kotevski

Факултет за информатички и комуникациски технологии,
Универзитет „Св. Климент Охридски“, Северна Македонија;
Faculty of Information and Communication Technologies,
University St Climent Ohridski, North Macedonia;

Никола Рендевски / Nikola Rendeovski

Факултет за информатички и комуникациски технологии,
Универзитет „Св. Климент Охридски“, Северна Македонија;
Faculty of Information and Communication Technologies,
University St Climent Ohridski, North Macedonia;

Илија Христовски / Ilija Hristovski

Економски факултет,
Универзитет „Св. Климент Охридски“, Северна Македонија;
Faculty of Economy,
University St Climent Ohridski, North Macedonia;

Христина Спасовска / Hristina Spasovska

Факултет за електротехника и информациски технологии,
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“, Скопје, Северна Македонија;
Faculty of Electrical Engineering and Information Technologies,
Ss. Cyril and Methodius University, North Macedonia;

Роман Голубовски / Roman Golubovski

Природно-математички факултет,
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“, Скопје, Северна Македонија;
Faculty of Mathematics and Natural Sciences,
Ss. Cyril and Methodius University, North Macedonia;

Маре Србиновска / Mare Srbinovska

Факултет за електротехника и информациски технологии,
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“, Скопје, Северна Македонија;
Faculty of Electrical Engineering and Information Technologies,
Ss. Cyril and Methodius University, North Macedonia;

Билјана Златановска / Biljana Zlatanovska

Факултет за информатика,
Универзитет „Гоце Делчев“, Штип, Северна Македонија;
Faculty of Computer Science,
Goce Delcev University, Stip, North Macedonia;

Александра Стојанова Илиевска / Aleksandra Stojanova Ilievska

Факултет за информатика,
Универзитет „Гоце Делчев“, Штип, Северна Македонија;
Faculty of Computer Science,
Goce Delcev University, Stip, North Macedonia;

Мирјана Коцалева Витанова / Mirjana Kocaleva Vitanova

Факултет за информатика,
Универзитет „Гоце Делчев“, Штип, Северна Македонија;
Faculty of Computer Science,
Goce Delcev University, Stip, North Macedonia;

Ивана Сандева / Ivana Sandeva

Факултет за електротехника и информациски технологии,
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“, Скопје, Северна Македонија;
Faculty of Electrical Engineering and Information Technologies,
Ss. Cyril and Methodius University, North Macedonia;

Билјана Читкушева Димитровска / Biljana Citkuseva Dimitrovska

Електротехнички факултет,
Универзитет „Гоце Делчев“, Штип, Северна Македонија;
Faculty of Electrical Engineering,
Goce Delcev University, Stip, North Macedonia

Наташа Стојковиќ / Natasa Stojkovik

Факултет за информатика,

Универзитет „Гоце Делчев“, Штип, Северна Македонија;

Faculty of Computer Science,

Goce Delcev University, Stip, North Macedonia;



Трета меѓународна конференција ЕТИМА Third International Conference ETIMA

PREFACE

The Third International Conference “Electrical Engineering, Technology, Informatics, Mechanical Engineering and Automation – Technical Sciences in the Service of the Economy, Education and Industry” (ETIMA’25), organized by the Faculty of Electrical Engineering at the “Goce Delchev” University – Shtip, represents a significant scientific event that enables interdisciplinary exchange of knowledge and experience among researchers, professors, and experts in the field of technical sciences. The conference was held in an online format and brought together 78 authors from five different countries.

The ETIMA conference aims to establish a forum for scientific communication, encouraging multidisciplinary collaboration and promoting technological innovations with direct impact on modern life. Through the presentation of scientific papers, participants shared the results of their research and development activities, contributing to the advancement of knowledge and practice in relevant fields. The first ETIMA conference was organized four years ago, featuring 40 scientific papers. The second conference took place in 2023 and included over 30 papers. ETIMA’25 continued this scientific tradition, presenting more than 40 papers that reflect the latest achievements in electrical engineering, technology, informatics, mechanical engineering, and automation.

At ETIMA’25, papers were presented that addressed current topics in technical sciences, with particular emphasis on their application in industry, education, and the economy. The conference facilitated fruitful discussions among participants, encouraging new ideas and initiatives for future research and projects.

ETIMA’25 reaffirmed its role as an important platform for scientific exchange and international cooperation. The organizing committee extends sincere gratitude to all participants for their contribution to the successful realization of the conference and its scientific value.

We extend our sincerest gratitude to all colleagues who, through the presentation of their papers, ideas, and active engagement in discussions, contributed to the success and scientific significance of ETIMA’25.

The Organizing Committee of the Conference

ПРЕДГОВОР

Третата меѓународна конференција „Електротехника, Технологија, Информатика, Машинство и Автоматика – технички науки во служба на економијата, образованието и индустријата“ (ЕТИМА’25), организирана од Електротехничкиот факултет при Универзитетот „Гоце Делчев“ – Штип, претставува значаен научен настан кој овозможува интердисциплинарна размена на знаења и искуства меѓу истражувачи, професори и експерти од техничките науки. Конференцијата се одржа во онлајн формат и обедини 78 автори од пет различни земји.

Конференцијата ЕТИМА има за цел да создаде форум за научна комуникација, поттикнувајќи мултидисциплинарна соработка и промовирајќи технолошки иновации со директно влијание врз современото живеење. Преку презентација на научни трудови, учесниците ги споделуваат резултатите од своите истражувања и развојни активности, придонесувајќи кон унапредување на знаењето и практиката во релевантните области.

Првата конференција ЕТИМА беше организирана пред четири години, при што беа презентирани 40 научни трудови. Втората конференција се одржа во 2023 година и вклучи над 30 трудови. ЕТИМА’25 продолжи со истата научна традиција, презентирајќи повеќе од 40 трудови кои ги отсликуваат најновите достигнувања во областа на електротехниката, технологијата, информатиката, машинството и автоматиката.

На ЕТИМА’25 беа презентирани трудови кои обработуваат актуелни теми од техничките науки, со посебен акцент на нивната примена во индустријата, образованието и економијата. Конференцијата овозможи плодна дискусија меѓу учесниците, поттикнувајќи нови идеи и иницијативи за идни истражувања и проекти.

ЕТИМА’25 ја потврди својата улога како значајна платформа за научна размена и интернационална соработка. Организациониот одбор упатува искрена благодарност до сите учесници за нивниот придонес кон успешната реализација на конференцијата и нејзината научна вредност. Конференцијата се одржа онлајн и обедини седумдесет и осум автори од пет различни земји.

Изразуваме голема благодарност до сите колеги кои со презентирање на своите трудови, идеи и активна вклученост во дискусиите придонесоа за успехот на ЕТИМА’25 и нејзината научна вредност.

Организационен одбор на конференцијата

СОДРЖИНА / TABLE OF CONTENTS:

СОВРЕМЕНО РАНОГРАДИНАРСКО ПРОИЗВОДСТВО СО ПРИМЕНА НА ОБНОВЛИВИ ЕНЕРГЕТСКИ ИЗВОРИ И ТЕХНОЛОГИИ.....	15
ШИРОКОПОЈАСЕН ПРЕНОС НА ПОДАТОЦИ ПРЕКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКАТА МРЕЖА	25
TRANSIENT PHENOMENA IN BLACK START	32
OPTIMIZATION OF SURPLUS ELECTRICITY MANAGEMENT FROM MUNICIPAL PHOTOVOLTAIC SYSTEMS: VIRTUAL STORAGE VS BATTERY SYSTEMS.....	43
IMPACT OF LIGHT POLLUTION ON ENERGY EFFICIENCY	53
ПЕРСПЕКТИВИ, ПРЕДИЗВИЦИ И ИНОВАЦИИ ВО ПЕРОВСКИТНИТЕ СОЛАРНИ КЕЛИИ	61
ПРИМЕНА НА НАНОМАТЕРИЈАЛИ КАЈ ФОТОВОЛТАИЧНИ КЕЛИИ ЗА ЗГОЛЕМУВАЊЕ НА НИВНАТА ЕФИКАСНОСТ ПРЕКУ НАМАЛУВАЊЕ НА РАБОТНАТА ТЕМПЕРАТУРА	68
LONG-TERM POWER PURCHASE AGREEMENT FOR PHOTOVOLTAIC ENERGY AS A SOLUTION FOR ENHANCING THE PROFITABILITY OF THE TASHMARUNISHTA PUMPED-STORAGE HYDRO POWER PLANT	75
СПОРЕДБЕНА АНАЛИЗА НА ПОТРОШУВАЧКА, ЕНЕРГЕТСКА ЕФИКАСНОСТ И ТРОШОЦИ КАЈ ВОЗИЛА СО РАЗЛИЧЕН ТИП НА ПОГОН	87
АВТОМАТСКИ СИСТЕМ ЗА НАВОДНУВАЊЕ УПРАВУВАН ОД ARDUINO МИКРОКОНТРОЛЕР	95
ПРИМЕНА НА WAMS И WACS СИСТЕМИ ВО SMART GRID	103
IoT-BASED ENVIRONMENTAL CONTROL IN 3D PRINTER ENCLOSURES FOR OPTIMAL PRINTING CONDITIONS.....	112
BENEFITS OF STUDYING 8086 MICROPROCESSOR FOR UNDERSTANDING CONTEMPORARY MICROPROCESSOR.....	123
ПРАКТИЧНА СИМУЛАЦИЈА НА SCADA СИСТЕМ ЗА СЛЕДЕЊЕ И РЕГУЛАЦИЈА НА НИВО НА ТЕЧНОСТ ВО РЕЗЕРВОАР	130
ADVANCEMENTS IN INDUSTRIAL DIGITAL SENSORS (VERSION 3.0 TO 4.0) AND RADAR SYSTEMS FOR OBJECT DETECTION: A STATE-OF-THE-ART REVIEW.	140
CHALLENGES AND SOLUTIONS FOR ENHANCING DRONE-TO-TOC COMMUNICATION PERFORMANCE IN MILITARY AND CRISIS OPERATIONS..	148
BRIDGING TELECOM AND AVIATION: ENABLING SCALABLE BVLOS DRONE OPERATIONS THROUGH AIRSPACE DIGITIZATION.....	157
MEASURES AND RECOMMENDATIONS FOR EFFICIENCY IMPROVEMENT OF ELECTRICAL MOTORS	167
USE OF MACHINE LEARNING FOR CURRENT DENSITY DISTRIBUTION ESTIMATION OF REBCO COATED CONDUCTORS	180
APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN DENTAL MEDICINE	186
ИНТЕГРАЦИЈА НА ДИГИТАЛНИОТ СПЕКТРОФОТОМЕТАР ВО ДЕНТАЛНАТА МЕДИЦИНА – НОВИ МОЖНОСТИ ЗА ТОЧНОСТ И КВАЛИТЕТ	194

CORRELATION OF DENTAL MEDICINE STUDENTS' PERFORMANCE IN PRECLINICAL AND CLINICAL COURSES	205
INTRAORAL ELECTROSTIMULATOR FOR RADIATION INDUCED XEROSTOMIA IN PATIENTS WITH HEAD AND NECK CANCER.....	214
ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE OF ENDODONTIC EQUIPMENT WITH GASTRIC PACEMAKER	221
DENTAL IMPLANTS ANALYSIS WITH SEM MICROSCOPE	226
ПРЕДНОСТИ И НЕДОСТАТОЦИ ПРИ УПОТРЕБА НА ЛАСЕР ВО РЕСТАВРАТИВНАТА СТОМАТОЛОГИЈА И ЕНДОДОНЦИЈА.....	231
LASERS AND THEIR APPLICATION IN PEDIATRIC DENTISTRY	238
INCREASE OF ENVIRONMENTALLY RESPONSIBLE BEHAVIOUR THROUGH EDUCATION AND TECHNOLOGICAL INNOVATION.....	242
A DATA-DRIVEN APPROACH TO REAL ESTATE PRICE ESTIMATION: THE CASE STUDY SLOVAKIA.....	249
ANALYSIS OF THE BACKWARD IMPACTS OF A PHOTOVOLTAIC POWER PLANT ON THE DISTRIBUTION SYSTEM	261
VARIANT SOLUTIONS FOR A PARKING LOT COVERED WITH PHOTOVOLTAIC PANELS.....	268
COMPARISON OF ENERGY STATUS IN PORTUGAL AND IN SLOVAKIA	279
DESIGN, ANALYSIS AND IMPLEMENTATION OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS ...	286
BATTERY STORAGE IN TRACTION POWER SUPPLY	297
THE ROLE OF CYBERSECURITY AWARENESS TRAINING TO PREVENT PHISHING.....	304
A REVIEW OF RESOURCE OPTIMIZATION TECHNIQUES IN INTRUSION DETECTION SYSTEMS	311
APPLICATION OF A ROBOTIC ARM IN A SIMPLE PICK-AND-DROP OPERATION	321
SIMULATION-BASED PERFORMANCE ANALYSIS OF A SECURE UAV-TO-TOC COMMUNICATION FRAMEWORK IN MILITARY AND EMERGENCY OPERATIONS	328
DIGITALIZATION OF BPM USING THE CAMUNDA SOFTWARE TOOL ON THE EXAMPLE OF THE CENTRAL BANK OF MONTENEGRO	339
DESIGNING A SECURE COMMUNICATION FRAMEWORK FOR UAV-TO-TOC OPERATIONS IN MILITARY AND EMERGENCY ENVIRONMENTS.....	349



Трета меѓународна конференција ЕТИМА

Third International Conference ETIMA

UDC: 621.383.51:549.51

<https://www.doi.org/10.46763/ETIMA253161c>

ПЕРСПЕКТИВИ, ПРЕДИЗВИЦИ И ИНОВАЦИИ ВО ПЕРОВСКИТНИТЕ СОЛАРНИ КЕЛИИ

Цветановска Мартина¹

¹Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ - Скопје

email: cvetanovskamartina99@gmail.com

Апстракт

Перовскитните соларни ќелии се еден од најперспективните напредоци во фотоволтаиката, нудејќи висока ефикасност и ниска цена на производство во споредба со традиционалните силициумски ќелии. Нивните уникатни оптички и електронски својства овозможуваат конверзија на сончевата енергија со ефикасност поголема од 25%. Сепак, нивната практична примена е ограничена од нестабилноста на материјалот, деградацијата при изложеност на влага и кислород, како и од присуството на токсични компоненти како оловото.

Овој труд ги анализира главните предизвици поврзани со стабилноста и долготрајноста на перовскитните ќелии, како и можностите за нивно надминување преку напредни стратегии како што се нови инкапсулациски техники, замена на токсичните компоненти и подобрување на кристалната структура. Дополнително, се разгледуваат можностите за индустриска примена и тандем соларни ќелии, каде перовскитите се комбинираат со силициум за зголемување на ефикасноста.

Преку систематски преглед на најновите истражувања, трудот ги идентификува предизвиците и перспективите за идниот развој на перовскитните соларни ќелии, потенцијално позиционирајќи ги како водечка технологија во иднината на обновливите извори на енергија.

Клучни зборови:

перовскитни соларни ќелии, ефикасност, стабилност, индустриска примена, инкапсулација, обновливи извори на енергија

1. Вовед

Фотоволтаичната технологија претставува столб на глобалната транзиција кон обновлива енергија. Сепак, и покрај значителните достигнувања во ефикасноста и цената на силициумските ќелии, истражувачите сè повеќе се насочуваат кон нови материјали со подобри својства и пониски производствени барања. Еден од најреволуционерните материјали во последната деценија се перовскитите. Во овој труд се разгледуваат технолошките перспективи, се анализираат предизвиците и се презентираат најновите иновации кои придонесуваат кон развојот и примена на перовскитните соларни ќелии.

Перовскитните соларни ќелии (PSC) се базираат на материјали со кристална структура ABX_3 , каде „A“ е органски или неоргански катјон, „B“ е метален катјон (најчесто Pb^{2+}), а „X“ е халиден анјон (Cl^- , Br^- , I^-). Оваа структура овозможува широка можност за модификација, што директно влијае врз нивните оптички и електронски својства. Според извештаите на NREL (2024), PSC достигнуваат ефикасности од 25–26%, со потенцијал за понатамошен раст преку тандем технологии.

Сепак, PSC сè уште се експериментална технологија – главните бариери се хемиската

нестабилност, брзата деградација под атмосферски влијанија, и присуството на токсични компоненти. Од таа причина, во последните години се интензивирани истражувањата во три насоки:

- подобрување на материјалниот состав и структурната стабилност,
- развој на инкапсулациски системи,
- индустриска примена преку тандем архитектури.

Целта на овој труд е да прикаже детална анализа на технолошките, еколошките и практичните предизвици, како и да ги систематизира најиновативните решенија кои може да го забрзаат преминот на PSC од лаборатории до комерцијална примена.

2. Преглед на литературата

Перовскитните соларни ќелии (PSC) за првпат се предложени како фотоволтаичен материјал од Kojima et al. [8], при што биле вградени органометални халиди во структурата на DSSC (Dye-Sensitized Solar Cells). Почетната ефикасност изнесувала само 3.8%, но тоа ја отвори вратата за нова генерација на фотоволтаични истражувања. Веќе до 2012 година, групата на Miyasaka и Grätzel [9] ја подобрува ефикасноста на PSC до 10%, користејќи мезопорозна TiO_2 структура и PbI_2 како апсорбент.

Во следните години, напредокот е експоненцијален. Според Green et al. [4], лабораториските ќелии денес достигнуваат сертифицирана ефикасност од над 26%, со користење на модифицирани органски катјони и оптимизирани интерфејсни слоеви. Тие резултати го надминуваат растот на ефикасност на сите претходни фотоволтаични технологии, вклучувајќи ги силициумските, кадмиум телуридните и CIGS системите.

Сепак, сериозни ограничувања остануваат. Според Tress et al. [16], главниот проблем со PSC е хемиската нестабилност – под дејство на влага, кислород, УВ зрачење и топлина, перовскитниот слој доживува брза деградација. Најранливи се органските компоненти, особено метиламониум јодидот (MAI), кој лесно се распаѓа и води кон губење на структурата.

Saliba et al. [14] покажуваат дека употребата на „тројни катјони“ – комбинација од метиламониум (MA^+), формамидиниум (FA^+) и цезиум (Cs^+) – води до зголемена термичка и фазна стабилност, како и до подобра кристализација. Оваа структура се смета за златен стандард во модерната PSC архитектура, особено кога се комбинира со *Spiro – OMeTAD* како транспортен слој за дупки.

Покрај стабилноста, токсичноста на Pb^{2+} е централна тема во литературата. Gholipour et al. [3] предлагаат замена со калај (Sn^{2+}), бисмут (Bi^{3+}) и антимон (Sb^{3+}), но добиените ќелии имаат значително пониска ефикасност (<10%) и нестабилност поради оксидација. Како компромис, Jiang et al. [6] предлагаат употреба на напредна инкапсулација, која го „заклучува“ оловото и спречува негов контакт со надворешната средина.

Од аспект на индустриска примена, тандем PSC-Si соларни ќелии се најперспективната насока. Според извештајот на Oxford PV [12], овие структури достигнуваат над 29.5% ефикасност во индустриски услови. Горниот перовскитен слој апсорбира видлива светлина, додека долниот силициум слој го апсорбира инфрацрвениот спектар – со што се зголемува вкупното искористување на сончевата енергија.

Врз основа на досегашните истражувања, може да се сумираат следниве научни согледувања:

- Перовскитите имаат супериорни оптоелектронски својства, но страдаат од чувствителност на влага и топлина.

- Структурните подобрувања (како тројни катјони и адитиви) значајно ја зголемуваат стабилноста.
- Инкапсулацијата игра голема улога во реална примена.
- Замена на оловото сè уште претставува технолошки предизвик.
- Тандем ќелиите се носител на идниот комерцијален потенцијал на PSC.

Овој преглед дава основа за дефинирање на методолошкиот пристап кој ќе биде користен во овој труд за да се испита влијанието на архитектурата и составот на PSC врз нивната стабилност и ефикасност.

3. Методологија

Трудот е насочен кон анализа на факторите што ја ограничуваат практичната примена на перовскитните соларни ќелии, со фокус на стабилноста и ефикасноста при различни архитектури, материјали и инкапсулациски техники. Методологијата комбинира теориска анализа, симулација со MATLAB/Simulink и преглед на експериментални податоци од најновите научни трудови. Истовремено, се анализираат условите на деградација и се моделира влијанието на температурата, влагата и составот врз перформансите на PSC.

3.1 Геометрија на моделот

Основната структура на ќелијата се моделира како планарна конфигурација со следниве слоеви:

- транспарентна проводна подлога (*ITO*),
- слој за транспорт на електрони (*TiO₂* или *SnO₂*),
- перовскитен апсорбер (*MAPbI₃*, *FAPbBr₃*, или тројни катјони),
- слој за транспорт на дупки (*Spiro – OMeTAD*),
- метална електрода (*Au, Ag, Cu*).

Дополнително се моделираат PSC во тандем конфигурација со силициум, за проценка на ефикасноста при сериски поврзани ќелии.

3.2 Примена на MATLAB/Simulink

Во MATLAB/Simulink се имплементира моделот на фотоволтаичен уред со следните параметри:

- температура на работа: 25°C–85°C,
- осветлување: 1000 W/m²,
- ширина на забранета зона: 1.55 eV (перовскит),
- дебелина на апсорбер: 400 nm–700 nm,
- отворен напон (*V_{oc}*) и краткоспојна струја (*I_{sc}*) базирани на NREL модели.

Равенките што ја дефинираат струјата и напонот се:

$$I = I_{LG} - I_{OS} \left(\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right) - \frac{(V + IR_s)}{R_{SH}}$$

$$P_{max} = I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF$$

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} \cdot V_{oc}}$$

3.3 Параметри за анализа на стабилност

За анализа на стабилноста се користат следните влезни услови:

- експонирање на кислород и влага (85% RH, 85°C),
- време на изложеност: 1000h,
- варијации во составот (Pb-вклучени и Pb-слободни перовскити),
- типови на инкапсулација: стаклена бариера, алуминиумски оксид и PMMA/PDMS.

3.4 Анализа на деградација

Во моделот се вметнува деградациски фактор:

$$\eta(t) = \eta_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Каде што:

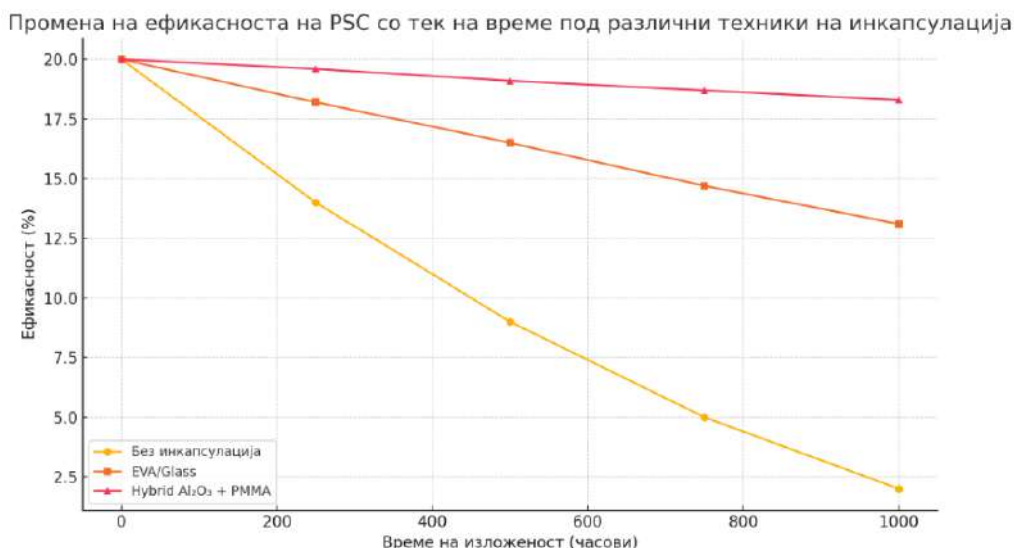
η_0 е почетната ефикасност,
 λ е стапката на деградација и
 t е времето во часови.

1.5 Табеларни вредности

Табелата бр. 1: Параметрите според видот на инкапсулација

Тип на инкапсулација	Темп. стабилност (1000h)	RH толеранција	Pb задржување	Ефикасност (%)
Без инкапсулација	<200h	0%	0%	<15%
EVA/Glass	~600h	40%	~60%	~19%
Al ₂ O ₃ + PMMA (Hybrid)	>1000h	>85%	>95%	>22%

Оваа анализа поставува основа за квантифицирање на ефектот на материјалниот избор и архитектурата врз перформансите и долготрајноста на PSC.



Слика бр. 1: Промена на ефикасноста на PSC со тек на време под различни техники на инкапсулација

Оваа слика прикажува споредбен дијаграм за промената на ефикасноста на перовскитните соларни ќелии со текот на времето при различни техники на инкапсулација. Како што се гледа:

- Без инкапсулација, ефикасноста опаѓа драстично за помалку од 500 часа.
- EVA/Glass значително ја успорува деградацијата.
- Хибридниот метод со Al_2O_3 и PMMA овозможува речиси стабилна ефикасност по 1000 часа.

4. Резултати и дискусија

4.1 Влијание на типот на инкапсулација врз деградацијата

Резултатите од симулацијата покажуваат дека инкапсулацијата има улога во одржување на ефикасноста на перовскитните соларни ќелии во текот на времето. Како што се гледа од Слика 1, ќелиите без инкапсулација ја губат својата функционалност за помалку од 500 часа, при што ефикасноста опаѓа под 5%. Оваа драстична деградација се должи на директната изложеност на влага и кислород, што доведува до распаѓање на перовскитниот слој, особено при присуство на метиламониум јодид (MAI).

Во случај на EVA/Glass капсулација, ефикасноста се задржува над 13% по 1000 часа, што укажува на значително подобрување, но и понатаму постои стабилен пад со време. Од друга страна, хибридна техника со Al_2O_3 и PMMA покажува речиси рамна линија – ефикасноста останува над 18% по 1000 часа, со минимална стапка на деградација ($\lambda \approx 0.0002 h^{-1}$). Ова ја потврдува супериорноста на нанобариерните материјали кои создаваат херметички заштитен систем.

4.2 Тандем перовскит-силициумски ќелии

Во моделот со сериски поврзани PSC – Si тандем ќелии, добиена е комбинирана ефикасност од 29.2%, со $V_{oc} = 1.75 V$, $FF = 82\%$ и $I_{sc} = 21.2 mA/cm^2$. Тандем архитектурата овозможува поделба на спектарот: перовскитниот горен слој ја апсорбира видливата светлина (400 – 750 nm), додека силициумот ги апсорбира подолгите

бранови ($> 750 \text{ nm}$). Со ова се елиминира спектралното преклопување и се намалува термалната загуба.

Овие податоци укажуваат на висок потенцијал за комерцијална примена, особено ако се обезбеди стабилна перформанса во реални климатски услови. Иако тандем ќелиите бараат посложена фабрикација, нивниот принос и компатибилност со постојната силициумска инфраструктура ги прават атрактивна опција за индустрија.

4.3 Резултати од термичка стабилност

При анализа на PSC модели на температура од 85°C и релативна влажност од 85%, добиените резултати покажуваат:

Табела бр. 2 Резултати од термичка стабилност

Состав на перовскит	Време до 50% деградација (T_{50})	Коментар
MA-based (MAPbI_3)	$< 200\text{h}$	Најмалку стабилен
$\text{FA} - \text{Cs} - \text{Pb}$ (троен катјон)	$\sim 600\text{h}$	Средна термичка стабилност
$\text{FA} - \text{Cs} - \text{Sn}$ (без Pb)	$\sim 300\text{h}$	Помалку токсичен, но нестабилен
$\text{FA} - \text{Cs} - \text{Pb} + \text{Al}_2\text{O}_3$ (инкап.)	$> 1000\text{h}$	Најдобра термална издржливост

Тројниот катјон $\text{FA} - \text{Cs} - \text{Pb}$, во комбинација со високоефикасна инкапсулација, покажува најголема стабилност и ефикасност. Замената на оловото со калај (Sn^{2+}) ги намалува еколошките ризици, но доведува до оксидација на Sn и нестабилна структура, што го ограничува неговиот долгорочен потенцијал.

Перовскитните соларни ќелии (PSC) претставуваат револуционерен напредок во областа на фотоволтаиката, благодарение на нивната висока ефикасност, ниската цена на производство и лесната обработка. Преку ова истражување беа идентификувани неколку аспекти што ја дефинираат нивната применливост на пазарот: стабилноста на материјалот, деградацијата под надворешни влијанија, изборот на инкапсулациони техники, како и можноста за тандем конфигурации со постоечки силициумски технологии.

5. Заклучок

Инкапсулацијата е критичен фактор за стабилноста на PSC. Хибридни системи базирани на Al_2O_3 и PMMA овозможуваат долгорочна термичка и хемиска заштита, со задржување на над 90% од првичната ефикасност по 1000 часа.

Тандем архитектурите, особено $\text{PSC} - \text{Si}$, покажуваат ефикасност до 29%, што претставува значителен напредок во споредба со класичните силициумски ќелии и овозможува поефикасно искористување на сончевиот спектар.

Замената на олово со помалку токсични елементи, како калај, сè уште е ограничена поради хемиска нестабилност и оксидација, што укажува на потреба од понатамошен материјален инженеринг.

Температурата и влажноста значително влијаат на стабилноста на PSC. Само трослојни перовскитни композиции со подобрени транспортни слоеви и ефективна инкапсулација можат да ја надминат бариерата на 1000h стабилност, што е минимален услов за индустриска примена.

Во контекст на глобалната енергетска транзиција, PSC имаат потенцијал да станат водечка технологија за следната генерација соларни уреди, доколку се надминат

постојните предизвици во однос на стабилност, токсичност и стандарди за долготрајност. Овие сознанија ја потврдуваат релевантноста на PSC како технологија во развој, каде јасно се преплетуваат перспективите за висока ефикасност, предизвиците во однос на стабилност и животен век, и иновативните решенија што го обликуваат нивниот пат кон комерцијална примена.

Референци

- [1] Bush, K. A., Palmstrom, A. F., Yu, Z. J., Boccard, M., Cheacharoen, R., Mailoa, J. P., ... & McGehee, M. D. (2017). 23.6%-efficient monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with improved stability. *Nature Energy*, 2(4), 17009. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.9>
- [2] Eperon, G. E., Stranks, S. D., Menelaou, C., Johnston, M. B., Herz, L. M., & Snaith, H. J. (2014). Formamidinium lead trihalide: a broadly tunable perovskite for efficient planar heterojunction solar cells. *Energy & Environmental Science*, 7(3), 982–988. <https://doi.org/10.1039/c3ee43822h>
- [3] Gholipour, S., Saliba, M., Grätzel, M., & Hagfeldt, A. (2021). Non-toxic and stable lead-free perovskite solar cells: Challenges and strategies for commercialization. *Energy & Environmental Science*, 14(5), 3068–3096. <https://doi.org/10.1039/D0EE03819C>
- [4] Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Hao, X. (2023). Solar cell efficiency tables (version 62). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 31(1), 3–15. <https://doi.org/10.1002/pip.3595>
- [5] Jeong, M., Choi, I. W., Go, E. M., Cho, Y., Kim, M., Lee, B., ... & Yang, C. (2020). Efficient perovskite solar cells via improved carrier management. *Nature*, 592(7852), 381–385. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03406-4>
- [6] Jiang, Q., Zhao, Y., Zhang, X., Yang, X., Chen, Y., Chu, Z., Ye, Q., Li, X., Yin, Z., & You, J. (2022). Surface passivation of perovskite film for efficient solar cells. *Nature Photonics*, 16(2), 123–130. <https://doi.org/10.1038/s41566-021-00913-4>
- [7] Kim, G. Y., Senanayak, S. P., Lilliu, S., Barlow, S., Dauskardt, R. H., & McGehee, M. D. (2018). Improving stability and performance of perovskite solar cells with encapsulation and barrier layers. *Energy & Environmental Science*, 11(9), 2609–2620. <https://doi.org/10.1039/C8EE01126A>
- [8] Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., & Miyasaka, T. (2009). Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. *Journal of the American Chemical Society*, 131(17), 6050–6051. <https://doi.org/10.1021/ja809598r>
- [9] Miyasaka, T., Im, J. H., Lee, C. R., & Grätzel, M. (2012). Efficient hybrid solar cells based on meso-superstructured organometal halide perovskites. *Nature Nanotechnology*, 7, 486–491. <https://doi.org/10.1038/nnano.2012.82>
- [10] NREL. (2023). *Best Research-Cell Efficiency Chart*. National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [11] Noel, N. K., Stranks, S. D., Abate, A., Wehrenfennig, C., Guarnera, S., Haghighirad, A. A., ... & Snaith, H. J. (2014). Lead-free organic–inorganic tin halide perovskites for photovoltaic applications. *Energy & Environmental Science*, 7(9), 3061–3068. <https://doi.org/10.1039/C4EE01076K>
- [12] Oxford PV. (2024). *Oxford PV achieves record 29.5% efficiency for commercial-sized perovskite-on-silicon tandem solar cell*. Retrieved from <https://www.oxfordpv.com>
- [13] Saliba, M., Correa-Baena, J. P., Graetzel, M., Hagfeldt, A., & Abate, A. (2018). How to make over 20% efficient perovskite solar cells in regular (n–i–p) and inverted (p–i–n) architectures. *Chemistry of Materials*, 30(13), 4193–4201. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.8b00136>
- [14] Saliba, M., Matsui, T., Domanski, K., Seo, J.-Y., Ummadisingu, A., Zakeeruddin, S. M., Correa-Baena, J.-P., Tress, W., Abate, A., Hagfeldt, A., & Grätzel, M. (2016). Incorporation of rubidium cations into perovskite solar cells improves photovoltaic performance. *Science*, 354(6309), 206–209. <https://doi.org/10.1126/science.aah5557>
- [15] Seo, J. Y., Noh, J. H., & Seok, S. I. (2019). Rational strategies for efficient perovskite solar cells. *Accounts of Chemical Research*, 52(2), 292–301. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.8b00558>
- [16] Tress, W., Yavari, M., Domanski, K., Yadav, P., Niesen, B., Correa-Baena, J.-P., Hagfeldt, A., & Grätzel, M. (2019). Predicting the open-circuit voltage of hybrid perovskite solar cells. *Advanced Energy Materials*, 9(12), 1803243. <https://doi.org/10.1002/aenm.201803243>
- [17] Yang, Z., Rajagopal, A., Chueh, C. C., Jo, S. B., & Jen, A. K. Y. (2016). Stable low-bandgap Pb–Sn binary perovskites for tandem solar cells. *Advanced Materials*, 28(42), 8990–8997. <https://doi.org/10.1002/adma.201602933>