УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
UNIVERSITY OF NOVI SAD
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES

ЗБОРНИК РАДОВА
ФАКУЛТЕТА ТЕХНИЧКИХ НАУКА
PROCEEDINGS OF THE FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES

Едиција: Техничке науке – зборници
Edition: Technical Sciences – Proceedings
Година: XLI
Vol. 41
Број: 10/2026
No. 10/2026

Нови Сад

Едиција: „Техничке науке – Зборници“
Година: XLI Свеска: 10
Издавач: Факултет техничких наука Нови Сад

Главни и одговорни уредник Едиције: проф. др Борис Думнић, декан Факултета техничких наука у Новом Саду

Уређивачки одбор
Editorial Board

Проф. др Марко Векић, главни уредник, Универзитет у Новом Саду, Нови Сад
Сара Копривица, заменик главног уредника, Универзитет у Новом Саду, Нови Сад

Проф. др Угљеша Марјановић, Универзитет у Новом Саду, Нови Сад
Проф. др Милена Крклеш, Универзитет у Новом Саду, Нови Сад
Проф. др Иван Каштелан, Универзитет у Новом Саду, Нови Сад
Др Радомир Ђокић, ванр. проф., Универзитет у Новом Саду, Нови Сад
Проф. др Немања Станисављевић, Универзитет у Новом Саду, Нови Сад
Проф. др Дејан Вукобратовић, Универзитет у Новом Саду, Нови Сад
Проф. др Данијела Грачанин, Универзитет у Новом Саду, Нови Сад
Проф. др Немања Кашиковић, Универзитет у Новом Саду, Нови Сад
Проф. др Бранка Гвозденац, Универзитет у Новом Саду, Нови Сад
Др Стеван Грабић, ванр. проф., Универзитет у Новом Саду, Нови Сад
Доц. др Сања Којић, Универзитет у Новом Саду, Нови Сад
Проф. др Милан Рапаић, Универзитет у Новом Саду, Нови Сад
Проф. др Лазар Ковачевић, Универзитет у Новом Саду, Нови Сад

Штампање одобрио: Савет за библиотечку и издавачку делатност ФТН, председник, проф. др Селена Самарџић Цвијановић

Штампа: ФТН – Графички центар ГРИД, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад

CIP-Каталогизација у публикацији
Библиотека Матице српске, Нови Сад

378.9(497.113)(082)
62

ЗБОРНИК радова Факултета техничких наука / главни и одговорни уредник
Борис Думнић. – Год. 7, бр. 9 (1974)-1990/1991, бр.21/22 ; Год. 23, бр 1 (2008)-. – Нови Сад : Факултет техничких наука, 1974-1991; 2008-. – илустр. ; 30 цм. – (Едиција: Техничке науке – зборници)

Месечно

ISSN 0350-428X

COBISS.SR-ID 58627591

Циљеви и области које часопис обухвата

Циљеви

Зборник радова Факултета техничких наука (Зборник) је мултидисциплинарни научни часопис који излази месечно. Главни циљеви часописа су:

- Објављивање и ширење истраживачких резултата, инжењерских знања и стручних искустава у научним и стручним областима заступљеним на Факултету техничких наука (ФТН) Универзитета у Новом Саду.
- Размена идеја између различитих научних области и јачање везе академске заједнице са привредом.
- Подстицање раста квалитета мастер радова студената Факултета техничких наука кроз објављивање научних чланака проистеклих из њих.

Зборник је отворен за прилоге истраживача, наставника, сарадника, студената и стручњака, како са Факултета техничких наука тако и из других институција у Србији и иностранству. Чланци проистекли из мастер радова студената ФТН-а су важан део његове образовне мисије, уз чланке искусних истраживача из академске заједнице и стручњака из праксе.

Зборник позива ауторе да приложе оригиналне научне чланке, теоријска и примењена истраживања, опште прегледе и критичке осврте, као и чланке намењене образовању и стручном усавршавању, укључујући студије случаја, из свих области заступљених на Факултету техничких наука, у складу са областима које часопис обухвата.

Области које часопис обухвата

Часопис покрива научне области које проистичу из студијских програма Факултета техничких наука:

- **Машинство,**
- **Електротехника и рачунарство,**
- **Грађевинарство,**
- **Саобраћај,**
- **Архитектура,**
- **Индустријско инжењерство и менаџмент,**
- **Инжењерство заштите животне средине и заштите на раду,**
- **Геодезија и геоматика,**
- **Интердисциплинарне:** Мехатроника; Графичко инжењерство и дизајн; Математика у техници; Анимација у инжењерству; Управљање ризиком од катастрофалних догађаја и пожара; Планирање и управљање регионалним развојем; Сценска архитектура, техника и дизајн; Биомедицинско инжењерство; Инжењерство третмана и заштите вода, Информациони инжењеринг; Чисте енергетске технологије; Инжењерство информационих система.

Aims and Scope

Aims

Proceedings of the Faculty of Technical Sciences (Proceedings) is a multidisciplinary scientific journal published monthly. Its main aims are to:

- Publish and disseminate research findings, engineering knowledge, and professional experience in the scientific and professional fields represented at the Faculty of Technical Sciences (FTS), University of Novi Sad.
- Promote the exchange of ideas across scientific disciplines and strengthen links between academia and industry.
- Encourage improvements in the quality of master's theses at the Faculty of Technical Sciences through the publication of scientific articles derived from them.

Proceedings welcomes contributions from researchers, academic staff, teaching and research associates, students, and professionals from the Faculty of Technical Sciences and other institutions in Serbia and abroad. Articles derived from FTS students' master's theses form an important part of its educational mission, alongside contributions from experienced academic researchers and practitioners.

Proceedings invites submissions of original scientific articles, theoretical and applied research, general surveys and critical reviews, as well as articles supporting education and professional development, including case studies, across all fields represented at the Faculty of Technical Sciences and within the journal's scope.

Scope

The journal covers scientific fields represented in the study curricula of the Faculty of Technical Sciences:

- **Mechanical Engineering,**
- **Electrical and Computer Engineering,**
- **Civil Engineering,**
- **Traffic and Transport Engineering,**
- **Architecture,**
- **Industrial Engineering and Management,**
- **Environmental and Occupational Safety Engineering,**
- **Geodesy and Geomatics,**
- **Interdisciplinary Fields:** Mechatronics; Graphic Engineering and Design; Mathematics in Engineering; Engineering Animation; Disaster Risk Management and Fire Safety; Regional Development Planning and Management; Scene Architecture and Design; Biomedical Engineering; Water Treatment and Safety Engineering; Information Engineering; Clean Energy Technologies; Information Systems Engineering.

Садржај

Научни чланци који су проистекли из мастер радова студената Факултета техничких наука

МАШИНСТВО

Синиша Петровић 1109-1112
Аутоматизација пројектовања и оптимизација геометрије посуде под притиском

Драгана Николић 1113-1116
Пројектовање система грејања, вентилације и климатизације за хотелски објекат

Невена Тот Петин 1117-1120
Пумпе као турбине, прерачунавање радних карактеристика

Николина Кљештан, Драган Рајновић 1121-1124
Затезне карактеристике и биокомпатибилност нерђајућег челика AISI 302 у различитим физиолошким растворима

Игор Гаковић 1125-1129
Могућност примене геотермалне енергије на систем даљинског грејања у Бечеју

Марко Зекић 1130-1134
Анализа радијуса контуре реза применом методе одзивне површине

ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И РАЧУНАРСТВО

Дарие Чолак 1135-1138
Систем електронског плаћања заснован на микросервисној архитектури

Милош Јосиповић 1139-1142
Оптимизација питања за квизове уз помоћ вештачке интелигенције

Новица Марковић, Дејан Јеркан 1143-1147
Индуктивни грејачи у транспорту флуида

Марија Михајловић, Невен Ковачки 1148-1151
Одређивање оптималних локација и снага кондензаторских батерија у радијалним дистрибутивним мрежама применом симулираног каљења

Милан Ајдер 1152-1155
Утицај асистената вештачке интелигенције на продуктивност, когнитивно оптерећење и концентрацију програмера

Милица Ђорђевић 1156-1160
Анализа перформанси Zephyr и FreeRTOS оперативних система на RISC-V архитектури процесора

Бојан Радовић 1161-1164
Пројектовање и имплементација архитектуре великих скупова података за прикупљање, обраду и анализу GitHub догађаја

Иван Ђукановић 1165-1168
Упоредна евалуација приступа 2PC, TCC и Saga за управљање дистрибуираним трансакцијама у микросервисној архитектури

Марија Остовић 1169-1172
Паметна аналитика и анализа потрошње електричне енергије

Драгомир Васић, Дејан Јеркан 1173-1177
Нумерички поступак за одређивање перформанси асинхроних машина

Александар Радивојевић 1178-1181
Имплементација Spring MVC веб апликација уз ослонац на инжењерство вођено моделима

Сања Петровић 1182-1185
Компаративна анализа одабраних приступа оптимизацији претраге у архитектури RAG

Милица Тадић, Јелена Ковачевић 1186-1190
Једно решење евалуационог радног оквира за дистрибуирано испитивање аудио система

Славиша Петровић 1191-1194
Имплементација подршке MIPS32 архитектуре у Dart SDK и Flutter окружењу

Дања Горонић, Калман Бабковић 1195-1198
Преслушавање између паралелних проводника

Александар Стојановић 1199-1202
Дизајн и имплементација EIP-7702-компатибилног Ethereum вишепотписног дигиталног новчаника

Анастасија Савић 1203-1206
Примена алата заснованих на вештачкој интелигенцији у реинжењерингу информационих система

Слађана Симић 1207-1210
Практична фузија улаза (камера и LiDAR сензор) за надзор саобраћаја: препознавање, праћење и бројање

Теодора Лазић 1211-1214
Симулација компромиса у дизајну лидара за анализу саобраћаја пре производње сензора

ГРАЂЕВИНАРСТВО

Милутин Поповић, Слободан Шупић 1215-1218
Процена стања и санација АБ конструкције јавног објекта у Новом Саду

Исидора Павловић, Милош Шешлија 1219-1223
Примена раскрсница са кружним током саобраћаја у циљу управљања брзинама на саобраћајној мрежи

Ђорђе Деспотовић, Слободан Шупић 1224-1227
Процена стања и санација АБ конструкције вишеспратне пословне зграде у Новом Саду

Дивна Ранковић, Иван Лукић 1228-1232
Процена стања АБ конструкције моста у Сремској Митровици уз примену БИМ алата

Бојан Барјактаровић 1233-1236
Индустријализација у канализационим системима

Ahmed Ataya Basheer Bouhuweesh 1237-1240
Студије случаја BIM-а унапређеног вештачком интелигенцијом за ефикасност управљања пројектима у великим грађевинским пројектима

Марина Лазаревић, Слободан Шупић 1241-1244
Процена стања и енергетска санација стамбеног објекта у Лозници

Јована Тепавчевић 1245-1248
Упоредна анализа традиционалних и хибридних опорaца за мостове применом вишекритеријумског одлучивања

Марко Шуњевић 1249-1252
Компаративна анализа временске ефикасности израде техничке документације у традиционалном и BIM приступу

Гонг Ји 1253-1256
Анализа главног уговора и управљање ризицима на пројекту фабрике гума у Србији

ИНЖЕЊЕРСТВО ЗАШТИТЕ ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ И ЗАШТИТЕ НА РАДУ

Александра Стевановски 1257-1260
Анализа утицаја пожара на депонијама на животну средину

Татјана Рељин, Маја Петровић 1261-1264
Квантитативна процена нивоа транспарентности ESG извештавања у индустријском сектору

Издвојени научни чланци*

Карлес Јискот Бускетс, Ђузепе Урбано Торторичи, Гуоћинг Гао, Фреде Блабјерг 1265-1277
Валидација геометријске методе за анализу стабилности при великим поремећајима два паралелно повезана снабдевајућа *grid-following* претварача
Тип рада: Оригинални научни рад

Фредерик Бланк, Штефан Бајнеке 1278-1285
Регулисани склоп складиштења енергије за смањење вршног оптерећења и премошћавање прекида напајања у системима серво-погона
Тип рада: Студија случаја

Милан З. Бјелица, Богдан Павковић, Иван Каштелан 1286-1291
Аутомобилско инжењерство у доба вештачке интелигенције и софтверски дефинисаних возила
Тип рада: Прегледни рад

Дејан Вукобратовић 1292-1301
Развој *6G* технологије ка повезаним интелигентним машинама
Тип рада: Прегледни рад

*Научни чланци објављени у овом делу нису проистекли из мастер радова студената Факултета техничких наука

Contents

Research Articles Derived from Master's Theses of Students of the Faculty of Technical Sciences

MECHANICAL ENGINEERING

Siniša Petrović — 1109-1112
Design Automation and Geometry Optimization of a Pressure Vessel

Dragana Nikolić — 1113-1116
Design of Heating, Ventilation and Air Conditioning Systems for a Hotel Facility

Nevena Tot Petin — 1117-1120
Pumps as Turbines, Conversion of Performance Characteristics

Nikolina Klještan, Dragan Rajnović — 1121-1124
Tensile Properties and Biocompatibility of Stainless Steel AISI 302 in Different Physiological Saline Solutions

Igor Gaković — 1125-1129
Possibility of Applying Geothermal Energy to the District Heating System in Bečej

Marko Zekić — 1130-1134
Analysis of the Cut Edge Contour Radius Using Response Surface Methodology

ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

Darie Čolak — 1135-1138
Electronic payment system based on microservice architecture

Miloš Josipović — 1139-1142
Optimization of Quiz Questions Using Artificial Intelligence

Novica Marković, Dejan Jerkan — 1143-1147
Inductive Heaters in Fluid Transfer

Marija Mihajlović, Neven Kovački — 1148-1151
Determination of Optimal Locations and Sizes of Capacitor Banks in Radial Distribution Networks Using Simulated Annealing

Milan Ajder — 1152-1155
The Impact of AI Assistants on Productivity, Cognitive Load, and Deep Concentration in Developer Work

Milica Đorđević — 1156-1160
Performance Analysis of Zephyr and FreeRTOS Operating Systems on RISC-V Processor Architecture

Bojan Radović — 1161-1164
Design and Implementation of a Big Data Architecture for Collecting, Processing, and Analyzing GitHub Events

Ivan Đukanović — 1165-1168
Comparative evaluation of 2PC, TCC, and Saga approaches for distributed transaction management in microservice architecture

Marija Ostović — 1169-1172
Smart Analytics and Analysis of Electrical Energy Consumption

Dragomir Vasić, Dejan Jerkan **Numerical Method for Evaluating the Performance of Induction Machines**	1173-1177
Aleksandar Radivojević **Implementation of Spring MVC Web Applications Based on Model-Driven Engineering**	1178-1181
Sanja Petrović **Comparative Analysis of Selected Retrieval Optimization Approaches in RAG Architecture**	1182-1185
Milica Tadić, Jelena Kovačević **An Evaluation Framework for Distributed Testing of Audio Systems**	1186-1190
Slaviša Petrović **Implementation of MIPS32 architecture support in Dart SDK and Flutter framework**	1191-1194
Danja Goronić, Kalman Babković **Crosstalk Between Parallel Conductors**	1195-1198
Aleksandar Stojanović **Design and Implementation of an EIP-7702-Compatible Ethereum Multi-Signature Wallet**	1199-1202
Anastasija Savić **Application of Artificial Intelligence-Based Tools in Information Systems Reengineering**	1203-1206
Slađana Simić **Practical Camera–LiDAR Fusion for Roadside Traffic Monitoring: Detection, Tracking, and Counting**	1207-1210
Teodora Lazić **Simulating LIDAR Design Tradeoffs for Traffic Analytics Before Sensor Production**	1211-1214

CIVIL ENGINEERING

Milutin Popović, Slobodan Šupić **The Assessment and Repair of RC Structure of Public Building in Novi Sad**	1215-1218
Isidora Pavlović, Miloš Šešlija **The applicaton of roundabouts as a measure for speed management on the urban road network**	1219-1223
Đorđe Despotović, Slobodan Šupić **Assessment and Repair of RC Structure of a Multi-Story Business Building in Novi Sad**	1224-1227
Divna Ranković, Ivan Lukić **Condition Assessment Of The Reinforced Bridge Construction In Sremska Mitrovica Using BIM Tools**	1228-1232
Bojan Barjaktarović **Industralization in the Sewage Systems**	1233-1236
Ahmed Ataya Basheer Bouhuweesh **Case Studies of AI-Augmented BIM for Project Management Efficiency in Large-Scale Construction**	1237-1240
Marina Lazarević, Slobodan Šupić **Assessment and Energy Retrofit of a Residential Building in Loznica**	1241-1244

Jovana Tepavčević 1245-1248
Comparative Analysis of Traditional and Hybrid Bridge Abutments Using Multi-Criteria Decision-Making Methods

Marko Šunjević 1249-1252
Comparative Analysis of Time Efficiency in Traditional and BIM Technical Documentation Approaches

Gong Ji 1253-1256
Main Contract Analysis and Risk Management for a Tire Factory Project in Serbia

ENVIRONMENTAL AND OCCUPATIONAL SAFETY ENGINEERING

Aleksandra Stevanovski 1257-1260
Environmental Impact Assessment of Landfill Fires

Tatjana Reljin, Maja Petrović 1261-1264
Quantitative Assessment of ESG Reporting Transparency in the Industrial Sector

Selected Research Articles*

Carles Jiskoot Busquets, Giuseppe Urbano Tortorici, Guoqing Gao, Frede Blaabjerg 1265-1277
Validation of the Geometric Method for Large-Signal Stability Analysis of Two Parallel Grid-Following Converters
Article type: Original Research Article

Frederic Blank, Stephan Beineke 1278-1285
Controlled Energy Storage System for Peak Shaving and Power-Failure Bridging in Servo Drive Systems
Article type: Case Study

Milan Z. Bjelica, Bogdan Pavković, Ivan Kaštelan 1286-1291
Automotive Engineering in the Age of AI and Software-Defined Vehicles
Article type: State-of-the-Art Review

Dejan Vukobratovic 1292-1301
6G Evolution Towards Connected Intelligent Machines
Article type: State-of-the-Art Review

*The research articles published in this section are not derived from master's theses of students of the Faculty of Technical Sciences

Реч уредника

Поштовани читаоци,

Зборник радова Факултета техничких наука (Зборник) овим октобарским издањем доноси неколико новина које ће бити укратко изложене у наставку.

ПРОШИРЕНИ САДРЖАЈИ ЗБОРНИКА

Од академске 2026/2027. године, почев од овог броја, Зборник ће, поред досадашњих чланака проистеклих из мастер радова студената ФТН-а, подстицати објављивање и следећих врста чланака на енглеском језику:

- **Прикази текућих истраживања и резултата**. У овом чланку истраживачи и истраживачке групе ФТН-а и других високошколских установа ће имати прилику представити своје пројекте, правце истраживања и промовисати остварене резултате.
- **Ауторски и прегледни радови.** Ови чланци ће бити посвећени актуелним научним и стручним темама, уз преглед стања у одређеној области и осврт на правце њеног даљег развоја.
- **Чланци из привреде.** У њима ће бити представљене технологије, искуства и конкретна решења која се примењују у индустрији.

Основна замисао овог проширења јесте да Зборнику дамо додатну вредност и учинимо га делотворним простором за размену идеја, представљање резултата и повезивање различитих научних и стручних области унутар ФТН-а, али и за јачање веза са привредом и широм академском заједницом.

У ОВОМ БРОЈУ — ПОДРШКА УГЛЕДНИХ НАУЧНИКА И СТРУЧЊАКА

Изузетна нам је част и велико задовољство што се професор Фред Блабјерг (Frede Blaabjerg), добитник Едисонове медаље, једног од највиших признања IEEE-а, одазвао позиву Уредништва и са својим тимом доставио први чланак за ново, проширено издање Зборника. Тиме је снажно подржао иницијативу за унапређење квалитета и значаја нашег часописа.

Професор Блабјерг и раније се одазивао иницијативама усмереним на унапређење техничких наука у Новом Саду и Србији. Својом трајном подршком потврђивао је не само изузетан научни углед већ и — ако ми је допуштена лична напомена — подједнако изузетну колегијалност и људску величину.

Посебно нам је задовољство што у овом броју објављујемо и:

- **Чланак из индустрије**, аутора др Фредерика Бланка (Frederic Blank) и др Штефана Бајнекеа (Stephan Beineke), који представља конкретна искуства аустријског предузећа КЕБА (KEBA) у примени батеријских система за смањење вршне потрошње (енгл. peak shaving) у сервопогонима.
- **Чланак о аутомобилском инжењерству у доба вештачке интелигенције и софтверски дефинисаних возила**, чији су аутори проф. др Милан З. Бјелица, проф. др Богдан Павковић и проф. др Иван Каштелан са Факултета техничких наука у Новом Саду.

- **Ауторски чланак** проф. др Дејана Вукобратовића са Факултета техничких наука у Новом Саду, посвећен развоју **6G технологије ка повезаним интелигентним машинама**.

Свим ауторима дугујемо велику захвалност што су се несебично одазвали овој иницијативи и својим знањем, трудом и добром вољом дали почетни подстицај једном новом развојном процесу.

НАСЛЕЂЕ И ЗАХВАЛНОСТ

Зборник радова има дугу традицију која сеже до 1960. године, непосредно након оснивања тадашњег Машинског факултета, из којег се развио данашњи Факултет техничких наука у Новом Саду. Од тог тренутка, Зборник је прошао неколико етапа развоја, а своје данашње постојање умногоме дугује недавно преминулом проф. др **Владимиру Катићу** (1954-2026) и редовном професору у пензији др **Жељену Трповском** који су га ревитализовали 2008/2009 године.

Професор Катић је био носилац визије обнове Зборника, разумевајући да је за ФТН као институцију која негује свој углед неопходно да издаје часопис који покрива све научне области заступљене на Факултету.

Професор Трповски је дао пресудан допринос развоју инфраструктуре неопходне за рад тако захтевног мултидисциплинарног часописа, у којем се годишње објављују и штампају стотине чланака. Као његов дугогодишњи и уважени уредник, више од петнаест година посвећено је бринуо о континуитету и квалитету Зборника.

ПОЗИВ

Позивамо наставнике, сараднике и истраживаче да посредством Зборника радова Факултета техничких наука представе своје идеје, поделе истраживачке резултате и допринесу квалитету и угледу нашег заједничког часописа.

проф. др Марко Векић
Главни уредник

Editor's note

Dear Readers,

With this October issue, the Proceedings of the Faculty of Technical Sciences (the Proceedings) introduces several new features, briefly outlined below.

EXPANDED CONTENT OF THE PROCEEDINGS

From the 2026/2027 academic year, beginning with this issue, the Proceedings will encourage the publication of the following types of articles in English, in addition to its existing articles based on master's theses by students of the Faculty of Technical Sciences (FTS):

- **Reports on ongoing research and results.** These articles will provide researchers and research groups at FTS and other higher education institutions with an opportunity to present their projects, research directions, and achievements.
- **Perspective and review articles.** These contributions will address current scientific and professional topics, providing an overview of the state of the art in a particular field and discussing directions for its further development.
- **Industry articles.** These contributions will present technologies, practical experience, and specific solutions implemented in industry.

The main purpose of this expansion is to bring added value to the Proceedings and make it an effective forum for exchanging ideas, presenting results, and connecting different scientific and professional fields within FTS, while also strengthening links with industry and the wider academic community.

IN THIS ISSUE — SUPPORT FROM DISTINGUISHED SCIENTISTS AND EXPERTS

It is a great honor and pleasure that Professor Frede Blaabjerg, recipient of the Edison Medal, one of IEEE's highest honors, accepted the Editorial Board's invitation and, together with his team, submitted the first article for the new, expanded edition of the Proceedings. In doing so, he has given strong support to the initiative to enhance the quality and standing of our journal.

Professor Blaabjerg has also supported earlier initiatives aimed at advancing technical sciences in Novi Sad and Serbia. His continued support has demonstrated not only his exceptional scientific standing but also—if I may add a personal observation—his equally remarkable collegiality and generosity of spirit.

We are particularly pleased that this issue also includes:

- **An industry article** by Dr. Frederic Blank and Dr. Stephan Beineke, presenting practical experience from the Austrian company KEBA in the application of battery systems for peak shaving in servo drive systems.
- **An article on automotive engineering in the age of artificial intelligence and software-defined vehicles**, authored by Professor Milan Z. Bjelica, Professor Bogdan Pavković, and Professor Ivan Kaštelan of the Faculty of Technical Sciences in Novi Sad.
- **A perspective article** by Professor Dejan Vukobratović of the Faculty of Technical Sciences in Novi Sad, devoted to **the evolution of 6G technology towards connected intelligent machines**.

We are deeply grateful to all the authors for their generous response to this initiative and for contributing their knowledge, effort, and goodwill to set this new phase of development in motion.

LEGACY AND GRATITUDE

The Proceedings has a long tradition dating back to 1960, shortly after the establishment of the then Faculty of Mechanical Engineering, which later developed into today's Faculty of Technical Sciences in Novi Sad. Since then, the Proceedings has passed through several stages of development. Its continued existence owes much to the late Professor **Vladimir Katić** (1954–2026) and retired Professor **Željen Trpovski**, who revitalized it in 2008/2009.

Professor Katić was the driving force behind the vision to revive the Proceedings. He recognized that FTS, as an institution committed to maintaining its reputation, needed to publish a journal covering all the scientific fields represented at the Faculty.

Professor Trpovski made a crucial contribution to developing the infrastructure required to support such a demanding multidisciplinary journal, which publishes and prints hundreds of articles each year. As its longstanding and respected editor, he devoted more than fifteen years to ensuring the continuity and quality of the Proceedings.

AN INVITATION TO CONTRIBUTE

We invite professors, associates, and researchers to use the Proceedings of the Faculty of Technical Sciences to present their ideas, share their research results, and contribute to the quality and standing of our journal.

Prof. Marko Vekić, PhD
Editor-in-Chief

Научни чланци који су проистекли из мастер радова студената Факултета техничких наука

Research Articles Derived from Master's Theses of Students of the Faculty of Technical Sciences

У овој свесци заступљени су радови са следећих области:

1. **МАШИНСТВО**
2. **ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И РАЧУНАРСТВО**
3. **ГРАЂЕВИНАРСТВО**
4. **ИНЖЕЊЕРСТВО ЗАШТИТЕ ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ И ЗАШТИТЕ НА РАДУ**

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 621.7/.9
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36AM01Petrovic

Аутоматизација пројектовања и оптимизација геометрије посуде под притиском

Design Automation and Geometry Optimization of a Pressure Vessel

Синиша Петровић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО

Кратак садржај – *У раду је приказан поступак аутоматизације пројектовања посуде под притиском за складиштење флуида у складу са стандардом EN 13445. Детаљно је описана конструкција посуде под притиском, као и процес израде CAD (Computer Aided Design) модела, уз примену рачунарских анализа ради провере геометрије и оптимизације конструкције на основу добијених резултата. Такође је приказано на који начин се наменски софтверски алати могу ефикасно користити као адекватна замена за специјализоване софтвере за пројектовање.*

Кључне речи: *посуда под притиском, модел, дискретизација модела, FEM анализа, оптимизација*

Abstract – *The paper presents a procedure for the automation of pressure vessel design for fluid storage in accordance with the EN 13445 standard. The construction of the pressure vessel is described in detail, as well as the process of creating the CAD (Computer Aided Design) model, with the application of computational analyses to verify the geometry and optimize the design based on the obtained results. Furthermore, the paper shows how dedicated software tools can be effectively used as an adequate alternative to specialized design software.*

Keywords: *pressure vessel, model, model discretization, FEM analysis, optimization*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Слободан Табаковић, ред. проф.

1. УВОД

Почевши од једноставног дрвеног точка па све до сложених потрошачких производа и савремених транспортних система, људи већ готово пет хиљада година обликују и конструишу различите техничке производе. Сваки од ових производа представља крајњи резултат дуготрајног и често веома захтевног процеса пројектовања. Савремени производи достигли су висок степен комплексности, те њихова реализација најчешће подразумева ангажовање тима стручњака из различитих области, са циљем да се почетна идеја трансформише у функционалан и поуздан технички систем. Основна мерила ефикасности процеса пројектовања јесу цена производа, квалитет и време потребно да производ стигне на тржиште. Независно од тога да ли је предмет пројектовања комплетан систем, појединачна компонента или мања модификација постојећег производа, захтеви купаца и менаџмента усмерени су ка смањењу трошкова, унапређењу квалитета и скраћењу времена развоја. Један од најефикаснијих приступа за истовремено смањење трошкова пројектовања и повећање квалитета и поузданости конструкција јесте аутоматизација самог процеса пројектовања. У наставку овог рада биће приказан поступак аутоматизације процеса пројектовања посуде под притиском, где ће се приказати поступак израде CAD модела над којим ће се применити рачунарске анализе како би се извршила оптимизација пројектоване конструкције.

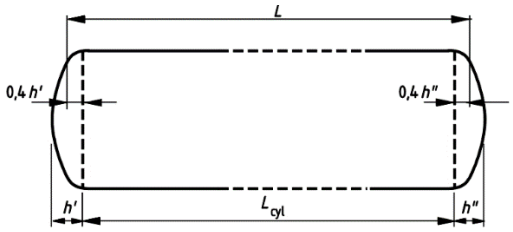
2. ПОСУДЕ ПОД ПРИТИСКОМ

Посуде под притиском представљају кључне елементе бројних индустријских система и користе се за складиштење, транспорт или процесирање флуида при притисцима који су виши од атмосферског. Оне се дефинишу као затворени контејнери код којих постоји разлика притиска између унутрашњости и спољашње средине, при чему је у већини случајева унутрашњи притисак доминантан. Због потенцијалних ризика које носи рад под повишеним притиском, пројектовање и израда ових конструкција захтевају висок степен поузданости и стриктно поштовање прописаних стандарда [1].

2.1. Конструкција

Конструктивно, посуда под притиском се најчешће састоји од цилиндричног омотача и завршних данаца, која могу бити равна, елиптична или торзиосферична, у зависности од радних услова и захтева стандарда. У појединим применама користе се и унутрашње преграде ради поделе посуде на више комора, што омогућава рад при различитим притисцима или температурама унутар исте конструкције. Посебну улогу имају прикључци, који служе за улаз и излаз флуида, као и за уградњу мерне и сигурносне опреме. Ови елементи представљају зоне повећаног напрезања и због тога морају бити адекватно ојачани и пројектовани у складу са важећим нормативима.

Носећи елементи, као што су стопе или седла, иако нису изложени унутрашњем притиску, од пресудног су значаја за стабилност и правилну расподелу оптерећења, при чему се један ослонац најчешће изводи као фиксан, а други омогућава термичко ширење конструкције. Пројектовање и израда посуда под притиском у европској пракси заснивају се на стандарду EN 13445, који дефинише захтеве у погледу димензионисања, избора материјала, производних процедура, контроле квалитета и испитивања. На слици 1. приказане су карактеристичне димензије посуде под притиском према овом стандарду.



Слика 1. Карактеристичне димензије посуде [2]

Овај стандард обухвата поступке испитивања механичких и хемијских својстава материјала, прописује правила за заваривање и контролу заварених спојева, као и примену неразорних метода испитивања, попут ултразвучних и радиографских тестова. Пре пуштања у рад, посуде морају проћи прописана испитивања притиском, чиме се обезбеђује висок ниво безбедности [3].

2.2. Израда CAD модела

У сржи CAD-а налази се тродимензионално моделирање. На тржишту је присутан велики број различитих софтвера за израду CAD модела.У нашем случају коришћен је Siemens NX. NX је интегрисана платформа која интегрише дизајн, симулацију и производњу у јединствено окружење, пружајући компанијама могућност да обједине све кључне фазе развоја производа у један процес. Софтвер омогућава инжењерима да креирају сложене 3D моделе компоненти и склопова, користећи параметарско, директно и површинско моделовање. Једна од кључних предности NX-а је интеграција CAD-а са CAE (Computer Aided Engineering) модулом, који омогућава анализе чврстоће, динамике, термичких карактеристика, вибрација и понашања материјала. У нашем конкретном случају примењен је параметарски приступ моделовања, при чему су димензије самог резервоара дефинисане као параметарске величине, док су димензије прикључака креиране са фиксним вредностима. Ова комбинација приступа омогућава оптимално управљање прецизношћу основних елемената модела уз задржавање флексибилности при додавању и изменама додатних компоненти. Целокупни процес моделовања извршен је у радном окружењу за моделовање (Modeling) у Siemens NX-у. Основу модела чини цилиндрични део, који је са обе стране затворен данцима и који се за њега заварују, као и носачи (стопе) преко којих се резервоар ослања на подлогу или платформу, у зависности од његове намењене употребе. У моделу смо изабрали торзиосферична данца. Димензије данца дефинисане су у складу са стандардом DIN 28011. Након израде основног модела променом параметара омогућено је једноставно и прецизно управљање димензијама самог резервоара. Следећи корак у развоју модела обухвата додавање додатних конструктивних елемената. Под овим елементима подразумевају се прикључак за пражњење, пуњење и озрачавање, носачи за ослањање резервоара и ревизиони отвор. Сви наведени елементи пројектовани су у складу са EN 13445 стандардом. Након интеграције прирубница, формира се комплетан модел, који је приказан на слици 2.



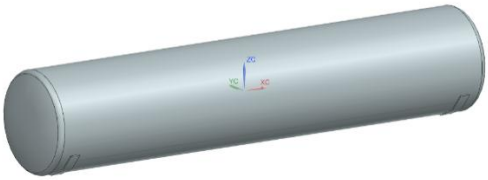
Слика 2. Модел посуде под притиском

3. CAE АНАЛИЗА

3.1. Идеализација геометрије

Студије показују да аналитичари CAE-а највише времена проводе припремајући моделе за симулацију. Ово време се углавном троши на изградњу математичког модела прилагођавањем, поједностављивањем и модификовањем изворне геометрије која представља стварни модел објекта [3].

Да би се обезбедила ефикасна CAE анализа и убрзао процес добијања резултата, неопходно је извршити идеализацију CAD модела. Овај поступак подразумева поједностављење модела уклањањем детаља који доприносе његовој сложености, а који нису критични за анализу. Под овим детаљима подразумевају се отвори, прикључци и носачи (стопе), чиме се смањује број елемената у мрежи и омогућава брже и прецизније извођење симулација, уз задржавање релевантних конструктивних карактеристика. Једна од главних предности софтвера Siemens NX јесте интегрисани процес идеализације модела који је доступан директно у оквиру модула за симулације. NX поседује уграђене команде које омогућавају поједностављење геометрије модела, уклањање непотребних елемената или попуну отвора. Применом ових команди сложен модел може се у кратком времену претворити у поједностављену верзију која, иако смањене сложености, задржава критичне конструктивне карактеристике, што омогућава добијање прецизних и поузданих резултата CAE анализе.



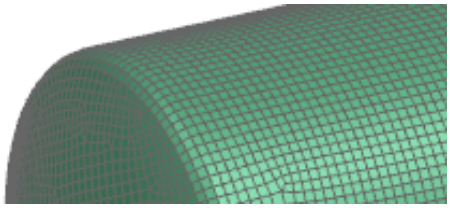
Слика 3. Идеализована геометрија модела

На тај начин добија се идеализовани модел који верно представља геометрију неопходну за прорачун, без непотребних детаља који би отежавали симулацију. Коначан изглед овако поједностављене геометрије приказан је на слици 3.

3.2. Израда мреже

Израда мреже у анализи коначних елемената представља поступак упрошћавања сложене, континуалне геометријске области на мање, једноставније делове – елементе. На тај начин континуум се дискретизује како би било могуће нумерички приближити физичке појаве и понашање конструкције. Разлагањем сложене структуре на велики број малих елемената омогућава се формирање система коначних једначина које рачунар може ефикасно да реши. Мрежа тако постаје основа целокупног FEM процеса, јер управо на њој почивају сви прорачуни – од напрезања и деформација, до преноса топлоте и других физичких величина. Три основна типа мрежа су 1D, 2D и 3D [3].

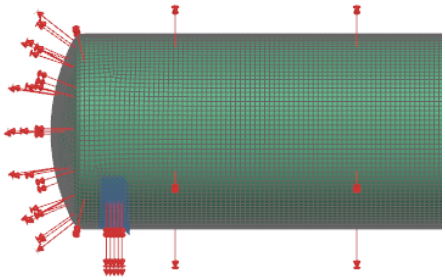
У конкретном случају изабрана је примена 2D мреже. Овај избор је оправдан и због њене ефикасности приликом анализа посуда под притиском, где танкозидне структуре могу бити прецизно представљене љуштастим елементима. Поред тога, коришћење 2D мреже омогућава добијање резултата анализе у краћем времену, смањује потребне рачунарске ресурсе и поједностављује процес израде мреже, а да притом не умањује тачност симулације. Применом команде “2D Mesh” над идеализованим моделом добија се мрежа која је приказана на слици 4.



Слика 4. 2D полигонална мрежа посуде

3.3. FEM анализа

Први корак у FEM (Finite Element Method) анализи представља дефинисање ограничења. У конкретном случају, као ограничења користе се пројекције ослонаца на цилиндричном делу, које су креиране приликом идеализације геометрије. Ове тачке или површине се фиксирају јер представљају непокретне делове посуде који нису изложени притиску и не би требало да се деформишу током анализе. Други корак у анализи представља дефинисање оптерећења. У конкретном случају, креиран је нови параметар који представља притисак унутар посуде, што омогућава једноставно мењање и прилагођавање према новим захтевима или условима пројекта. На овај начин анализа постаје флексибилна и омогућава брзе измене без потребе за поновним креирањем целог модела. На слици 5. приказана је мрежа са векторима који визуелно показују правце и смерове дејства притиска на посуду. Са дефинисањем ових вредности завршена је израда модела који омогућава аутоматизацију пројектовања посуде под притиском на основу притиска који делује унутар ње.



Слика 5. Визуелни приказ дејства притиска

У следећем поглављу биће приказано како овај модел функционише и какви се резултати добијају његовом применом, приказаће се практична примена оптимизације и процене сигурности конструкције.

4. ПРАКТИЧНА ПРИМЕНА МОДЕЛА

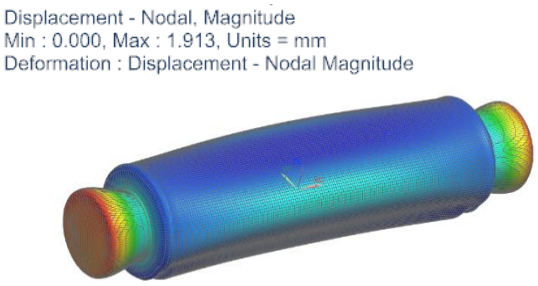
Да би се приказала ефикасност креираног модела на квалитетан начин извршено је пројектовање посуде дужине 8 метара и пречника 2 метра, у којој делује притисак од 3 bara. Након што се унесу параметри добија се модел као што је приказано на слици 6.



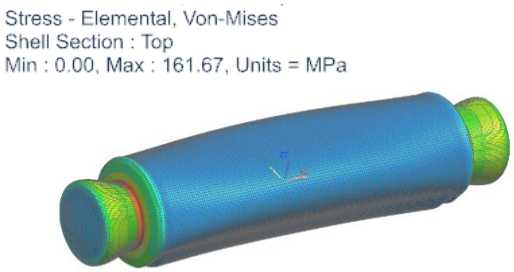
Слика 6. Добијена конструкција посуде

Након покретања анализе добија се прелиминарно решење које показује како конструкција реагује на дефинисани притисак. Ово решење служи као полазна тачка за даљу оптимизацију. У току истраживања је вршена промена дебљине зида све док није добијен адекватан резултат, тј. док није добијена вредност која не прелази вредност границе течења материјала од ког је посуда направљена, што у конкретном случају за челик износи око 180 MPa, а да се уз то задовољи степен сигурности од 1.5 према стандарду EN 13445, и да померање зида не пређе 2.5 mm као нека граница која је дефинисана. На основу прве анализе може се закључити да ли је потребно повећати или смањити дебљину зида. Процес је итеративан, при чему се вредност дебљине зида постепено мења, а резултати се међусобно пореде, посебно у смислу напона и деформација, како би се утврдило која конфигурација зида најбоље задовољава критеријуме сигурности. Поступак се понавља све док се не добије одговарајућа дебљина зида која одговара задатим условима. За дату конфигурацију модела добијена је дебљина од 6.5 mm, та вредност је заокружена на 7 mm. Када се та дебљина унесе као параметар дебљине, покрене

анализа, добијају се тражени резултати. На слици 7. приказана је вредност померање, а на слици 8. вредност Von-Misses-ових напона.



Слика 7. Вредност померања зида



Слика 8. Вредност Von-Misses-ових напона

5. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА

У претходном поглављу представљен је модел који омогућава аутоматизацију процеса пројектовања посуде под притиском. За конфигурацију дужине 8 метара, пречника 2 метра, и притисак унутар посуде од 3 bara, спроведена је серија анализа како би се утврдила оптимална дебљина зида. Након анализа утврђена је оптимална дебљина од 7 mm. На слици 7. види се да максимално померање за дебљину од 7 mm износи око 1,9 mm. Највеће померање је забележено на радијусу круне данца, што указује на његову конструктивну осетљивост. Исто тако, са слике 8. види се да је за исту дебљину зида максимална вредност Von Mises-ових напона 161,67 MPa, при чему су напони локализовани на истом критичном месту – радијусу круне данца. Из ових резултата може се закључити да је данце једно од критичних места на посуди. Због тога је и чест случај у пракси да се данца праве са дебљином зида која је за који милиметар већа у односу на цилиндрични део, посебно у случајевима када у посудама влада већи притисак. На основу спроведених анализа показано је да овакав тип симулације може бити веома користан не само за оптимизацију конструкције, већ и за проверу да ли предложено конструкцијско решење може издржати оптерећења којима ће бити изложено у реалним условима. Ово омогућава идентификацију критичних места, процену потребне дебљине зида и предвиђање понашања посуде у екстремним ситуацијама, чиме се значајно повећава сигурност и поузданост пројектоване конструкције.

6. ЗАКЉУЧАК

Процес пројектовања техничких система, посебно у области машинства, последњих деценија пролази кроз интензивну трансформацију услед развоја рачунарских технологија. Од традиционалног ручног цртања, преко дводимензионалног дигиталног моделовања, па до савремених интегрисаних CAD/CAE окружења, данашњи инжењер располаже алатима који у великој мери аутоматизују, убрзавају и унапређују процес пројектовања. Овај рад бави се управо значајем таквих технологија у пројектовању посуда под притиском, као и могућностима аутоматизације засноване на резултатима рачунарских анализа. У раду је приказана израда CAD модела и спровођење CAE анализе посуде под притиском у софтверу Siemens NX. Резултати нумеричке анализе омогућили су идентификацију најоптерећенијих зона на посуди, као и проверу да ли дебљина зида задовољава безбедносне критеријуме. Примена овог приступа у пројектовању посуда под притиском показала се посебно успешном, а могућности његовог даљег развоја су значајне. Иако на тржишту постоји већи број специјализованих софтвера који се користе за пројектовање оваквих посуда, сваки од ових наменских софтвера додатно кошта, тако да за некога ко има ограничене новчане ресурсе метода која је представљена може се користити као сасвим адекватна замена. Савремено инжењерство улази у период у ком ће дигитални алати, напредне симулације и вештачка интелигенција представљати кључне носиоце развоја, што ову област чини изузетно динамичном и обећавајућом за будуће генерације инжењера.

7. ЛИТЕРАТУРА

[1] S. P. H., S. Sankar, C. S. Sabarish and T. Thomas, “Design optimization of ammonia bullet pressure vessel,” *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET)*, vol. 8, no. 5, pp. —, May 2019, doi: 10.15680/IJIRSET.2019.0805086.

[2] SRPS EN 13445-1:2010, *Посуде под притиском које нису изложене пламену – Део 1: Опште одредбе*, Институт за стандардизацију Србије, 2010.

[3] P. Goncharov, I. Artamonov and T. Khalitov, *Engineering Analysis with NX Advanced Simulation*, Lulu Publishing Services, 2014, ISBN 978-1483417325.

Кратка биографија:



Синиша Петровић рођен је у Лозници 2001. год. Дипломирао је 2024. године на Факултету техничких наука у Новом Саду на студијском програму Производно машинство, исте године је уписао мастер студије.
Контакт: psinisa2001@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 621.43
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36AM02Nikolic

Пројектовање система грејања, вентилације и климатизације за хотелски објекат

Design of Heating, Ventilation and Air Conditioning Systems for a Hotel Facility

Драгана Николић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ЕНЕРГЕТИКА И ПРОЦЕСНА ТЕХНИКА

Кратак садржај – *У овом раду је приказан прорачун и избор опреме за грејање, вентилацију и климатизацију, подељена у изворе грејања и хлађења, прорачуне топлотних губитака и избор грејних тела специфицираних за хотелски објекат. У закључку је образложено зашто је усвојен одређени систем који ће на најефектнији начин обезбедити енергетске потребе објекта.*

Кључне речи: *грејање, вентилација, климатизација*

Abstract – *This paper presents the calculation and selection of heating, ventilation and air conditioning equipment, divided into heating and cooling sources, heat loss calculations and the selection of heating elements specific to a hotel facility. The conclusion explains why a particular system was adopted that will most effectively meet the facility's energy needs.*

Keywords: *heating, ventilation, air conditioning*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био проф. др Александар Анђелковић.

1. УВОД

Пројектовање система грејања, вентилације и климатизације у хотелима подразумева прецизно одређивање термичких оптерећења како би се обезбедили оптимални услови микроклиме у затвореном простору и енергетска ефикасност. У савременој пракси, употреба специјализованог софтвера омогућава детаљну анализу и димензионисање система, уз минимизирање грешака и бржу координацију са архитектонским плановима.
Преглед метода пројектовања хотела:

1.1. Анализа потреба и захтева

Дефинисање броја соба, капацитета хотела, јавних простора (ресторани, сале, теретане), процена термичких оптерећења за грејање, хлађење и вентилацију.

1.2. Избор типа система

VRF/VRV системи – флексибилни, омогућавају зонирање по собама. Централни HVAC системи – погодни за веће хотеле са централним котловима и климатизацијом. Подно грејање и хлађење – комфорни системи за собе.

1.3. Димензионисање и пројектовање

– Прорачун снаге грејања и хлађења
– Избор радијатора, вентилатора-конвектора, канала, ресетки и дифузора
– Планирање цевовода, канала и рекуператора ваздуха
– Оптимизација енергетске ефикасности.

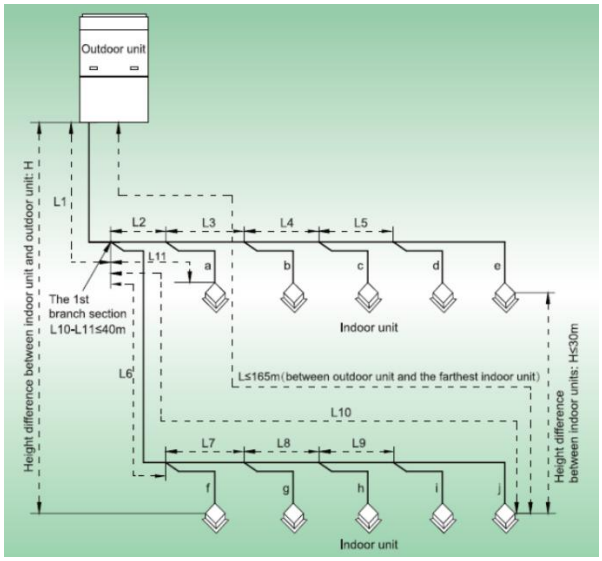
1.4. Софтвери

Софтвер омогућава симулацију термичких оптерећења, вентилације, потрошње енергије и димензионисања елемената система, као на пример HAP, AutoCAD, Ханибал и др.

Табела 1. Збирни губици топлоте по спратовима

	θ_{int}	A_h	V_h	Φ_{hl}
	°C	m^2	m^3	W
Сутерен	18,9	363,3	941,5	12002
Приземље	20,0	233,8	792,5	15200
1. Спрат	20,0	396,2	1215,9	28332
2. Спрат	20,0	304,8	987,7	18111
Поткровље	20,0	216,3	457,7	17914
Укупно		1514,4		91559,7

Као заједнички систем одабран је VRF (енгл. Variable Refrigerant Flow) систем који користи фреон који се континуирано прилагођава потребама појединачних просторија или зона.



Слика 1. Приказ повезивања спољне VRF јединице са унутрашњим [1]

2. ПРИНЦИП РАДА СИСТЕМА ГРЕЈАЊА, ВЕНТИЛАЦИЈЕ И ХЛАЂЕЊА

Принцип рада у режиму хлађења заснива се на парно-компресорском циклусу: Компресор у спољашњој јединици сабија расхладни гас, расте притисак и температура, затим у кондензатору се топлота предаје спољашњим ваздухом, а гас прелази у течно стање, течност долази до експанзионог вентила, где долази до пада притиска и температуре, након тога у испаривачу (унутрашња јединица) расхладно средство испарава и преузима топлоту из просторије, охлађени ваздух се вентилатором убацује у просторију, гас се враћа ка компресору и циклус се наставља.

Рад компресора (адијабатски процес), компресор тражи електричну енергију да би подигао температуру расхладног средства. Код VRF система, количина фреона која иде ка свакој унутрашњој јединици прецизно се дозира помоћу електронског експанзионог вентила, у зависности од захтева простора. Метода која се користила се заснива на прорачуну топлотних губитака у појединим трасама по 1 м предизоловане цеви, узимајући у обзир старост топловода и тренутно стање изолације

Расхладни учинак:

$$Q_e = m \cdot (h_1 - h_4) \left[\frac{W}{m}\right] \quad (1)$$

m – масени проток
h – енталпија расхладног средства
Коефицијент перформанси:

$$COP = \frac{Q_к}{W} \quad (2)$$

2.1. Принцип рада електро-котла

Базиран је на директној конверзији електричне енергије у топлоту.

$$Q = I^2 Rt \quad (3)$$

$$P = IU \quad (4)$$

Састоји се од: електричних грејача, измењивачког суда са водом, сигурног термостата, регулационог термостата и циркулационе пумпе. Принцип рада електро котла: термостат региструје пад температуре, укључују се грејачи, струја протиче кроз отпорник, отпорник се загрева, топлота се преноси кондукцијом на воду, циркулациона пумпа дистрибуира топлу воду ка радијаторима или подном грејању.

$$Q = mc\Delta T \quad (5)$$

Ефикасност котла η је приближно 99% јер се сва електрична енергија претвара у топлоту. COP = 1.

2.2. Принцип рада спољне и унутрашње јединице клима коморе за вентилацију

Компресор спољна јединица хлади или греја расхладни ваздух, расхладни флуид пролази кроз цевовод до унутрашње јединице, где се апсорбује или предаје топлоту ваздуху у просторији, вентилатори у унутрашњем покретању ваздуха кроз решетке и канале, осигуравајући уједначену температуру и квалитет ваздуха, систем може укључити рекуперацију топлоте и регулацију влажности.

Прорачун губитака топлоте извршен је у складу са стандардом СРПС ЕН 12831.

Укупни губици топлоте:

$$Q = Q_т + Q_v + Q_{rh} \ [W] \quad (6)$$

Q_T [W] – трансмисиони губици топлоте
Q_v[W] – вентилациони губици топлоте
Q_{rh} [W] – топлота за компензацију прекида грејања
Трансмисиони губитак топлоте:

$$Q_t = Q_0 \cdot (1 + Z_D + Z_S)\left[W\right] \quad (7)$$

Q_0 [W] – основни губитак топлоте
Z_d [-] – додатак на прекид у раду
Zs [-] – додатак на страну света
Основни губитак топлоте:

$$Q_0 = \sum_{i=1}^{n} k \cdot F_i \left(t_p - t_i\right)\left[W\right] \quad (8)$$

ki [W/m^{2}K] – коефицијент
Fi [m^2] – површина кроз коју се врши размена топлоте
tp [°C] – унутрашња температура
ts [°C] – спољна температура или температура суседне просторије
Вентилациони губитак топлоте:

$$Q_V = \sum\left(a \cdot b\right)_s \cdot R \cdot H \cdot \left(t_p - t_i\right) \cdot Z_E \ [W] \quad (9)$$

a [m^3/hmPa$^{2/3}$] – пропустиљивост процепа прозора и врата
l [m] – дужина процепа прозора и врата
R [-] – карактеристика просторије
H [WhPa$^{2/3}$/m^{3}K] – карактеристика зграде
Z_e [] – додатак за положај прозора
Просторије без вентилационог система:
V = max(0,5 · Vinf, Vmin)
при чему је Qv = 0,34 · V · (Tun – Ts).
Просторије са вентилационим системом:
V = 0,5 · Vinf + (1 – Nv) · Vsu + Vemch

3. ИЗБОР ГРЕЈНИХ ТЕЛА И ПРАТЕЋЕ ОПРЕМЕ

3.1. Избор каналске јединице

Унутрашња каналска јединица са инвертер мотором, има могућност блокирања дугмади на контролној табли, вентилатор са више брзине, опција подешавања измењивача топлоте. Капацитет грејања 3,2 kW и капацитет хлађења 2,8 kW. Расхладно средство је фреон R410A.



Слика 2. Унутрашња каналска јединица [4]

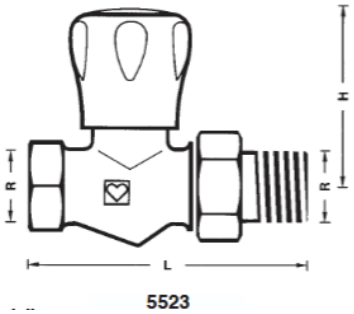
3.2. Избор касетне јединице



Слика 3. Изглед унутрашње касетне јединице [4]

Унутрашња касетна јединица има механички филтер (пластична мрежа), одвођење измењивача топлоте, главни и помоћни контролор, интегрисану одводну пумпу, четворосмерни превод ваздуха и вентилатор са више брзине, минималне брзине и висине величине. Блокови имају поуздану заштиту од замрзавања, преоптерећења и преливања кондензата. Капацитет грејања 6,3 kW и капацитет хлађења 5,6 kW. Расхладно средство је фреон R410A.

3.3. Избор радијаторског вентила



Слика 4. Избор радијаторског вентила [5]

HERZ-EK је ручни регулациони вентил за радијаторе са предрегулацијом, чија је главна намена регулација протока напојне воде на улазу у радијатор, прикључак је са конусним заптивачем.

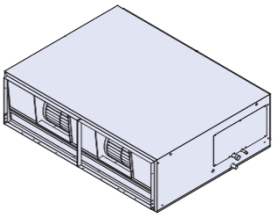
3.4. Избор експанзионе посуде



Слика 5. Изглед експанзионе посуде [4]

Експанзионе посуде играју кључну улогу у одржавању стабилности и ефикасности система грејања. Када се вода загрева, она се шири, што може довести до повећања притиска у систему. Експанзиона посуда ELBI ER 24 CE EL520024 апсорбује ово ширење, спречавајући прекомерно нагомилавање притиска и штитећи компоненте система од оштећења.

3.5. Избор клима коморе за вентилацију



Слика 6. Изглед унутрашње јединице клима коморе [7]

DK/DN сплит систем се налази од два одвојена елемента: - Унутрашња јединица високог статичког притиска (DK). - Компактна спољашња јединица (DN) са горњим испуштањем. Две јединице се повезују на лицу места коришћењем цеви за расхладно средство које испоручују други. DK/DN јединице су доступне у верзијама само за хлађење и са топлим пумпама, дизајнираним и оптимизованим за рад са расхладним средством R407C.

3.6. Предмер и предрачун

Предвиђена је набавка, транспорт и испорука свог потребног материјала и опреме, њихово уграђивање, испитивање и пуштање у пробни рад. Сав употребљени материјал мора бити према СРПС-у. Сви радови морају бити изведени стручном радном снагом, одговарајућим алатом, а у потпуности према српским прописима за ову врсту радова.

Табела 2. Укупан предрачун радова

Р. бр.	Опис	Укупно рад+материјал
	Хотел Theater	РСД
А	ГРЕЈАЊЕ	777.217,77
Б	КЛИМАТИЗАЦИЈА	6.034.851,45
В	ВЕНТИЛАЦИЈА	4.119.545,68
Г	ТРЕТИРАЊЕ САНИТАРНЕ ВОДЕ	205.959,00
Д	ПРИПРЕМНО ЗАВРШНИ РАДОВИ	445.502,96

4. ЗАКЉУЧАК

На основу извршених анализа усвојен је VRF систем као примарни извор грејања и хлађења, уз примену електро-котлова за посебне зоне. Укупни топлотни губици објекта од 91,5 kW потврђују да пројектовани системи задовољавају енергетске захтеве објекта. Предложено решење омогућава високу енергетску ефикасност, флексибилност управљања по зонама и дугорочну поузданост рада.

5. ЛИТЕРАТУРА

[1] https://www.hladisa.rs/sta-je-vrf/

[2] Рекнагел, Хенман и Шпренгер, *Грејање и климатизација*.

[3] Б. Тодоровић, *Пројектовање постројења за централно грејање*.

[4] https://greeklime.rs/Gree-GMV-S120WL-A-S

[5] https://www.etaz.rs/herz-radijatorski-ventil-1-2-ek-sn

[6] https://itim.rs/proizvod/elbi-ekspanziona-posuda-er-24-ce/

[7] https://lh.airwellres.com/sites/default/files/product_uploads/EDM_DKDN_A_3GB.pdf

Кратка биографија:



Драгана Николић рођена је у Новом Саду 1996. год. Завршила Средњу медицинску школу „7. април“ у Новом Саду, након чега 2015. год. уписује Факултет техничких наука у области Машинство – Енергетика и процесна техника. Bachelor рад одбранила је 2023. год., а мастер рад 2026. год.
Контакт: draganan186@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 621.22
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36AM03Petin

Пумпе као турбине, прерачунавање радних карактеристика

Pumps as Turbines, Conversion of Performance Characteristics

Невена Тот Петин, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Машинство – ЕНЕРГЕТИКА И ПРОЦЕСНА ТЕХНИКА

Кратак садржај – *У овом раду је извршена анализа и поређење неколико метода, познатих из стручне литературе, које омогућавају прерачунавање радних карактеристике пумпи у радне карактеристике које би те машине имале када би радиле у турбинском режиму. Резултати прорачуна турбинских радних карактеристика за једну једностепену и једну двоструjну пумпу упоређени су са доступним, стварно измереним турбинским карактеристикама те две пумпе. У уводном делу рада приказане су теоријске основе рада пумпи и турбина и детаљно су објашњене изабране методе прерачунавања пумпних радних карактеристика у турбинске.*

Кључне речи (три до пет): *пумпе, хидрауличне турбине, радне карактеристике, закони сличности*

Abstract – *This thesis analyses and compares several methods, known from the professional literature, that enable the conversion of pump operating characteristics into operating characteristics these machines would have if they were operating in turbine regime. The results of the calculation of turbine operating characteristics for one single-stage and one split-case pump are compared with the available, actually measured turbine characteristics of these two pumps. The introductory part of the thesis presents the theoretical background of the operation of pumps and turbines and explains in detail the selected methods for conversion of pump performance characteristics into turbine characteristics.*

Keywords: *Pumps, hydraulic turbines, performance characteristics, affinity laws*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Слободан Ташин, ванр. проф.

1. УВОД

Тема овог мастер рада је анализа проблема прерачунавања радних карактеристика центрифугалних пумпи у радне карактеристике које би те машине имале у турбинском режиму рада. Због једноставније конструкције и нижих трошкова у односу на турбине, центрифугалне пумпе представљају економски оправдану алтернативу, посебно у при-мени код малих хидроелектрана. У оквиру рада, анализирају се две методе, познате из стручне и научне литературе, које омогућавају прерачунавање пумпних радних карактеристика у турбинске. Обе методе примењене су на једну једностепену и једну двоструjну центрифугалну пумпу, а затим су се добијени резултати поредили са доступним измереним турбинским карактеристикама тих пумпи.

Пумпе представљају хидрауличне машине које служе за размену енергије између флуида и механичког система. Оне претварају механичку енергију у хидрауличну енергију, тако што повећавају притисак и омогућавају да се течност креће кроз систем.

Пумпе које раде као турбине се најчешће користе у малим хидроелектранама.

Мале хидроелектране могу играти изузетно значајну улогу када је реч о руралним подручјима и у енергетској ситуацији земаља у развоју. Турбина као примарна машина хидроелектране представља велики инвестициони трошак, који је тешко оправдати када је реч о малим хидроелектранама. Из тог разлога, једна од економски повољнијих могућности су пумпе које раде у турбинском режиму.

Постоји више метода које су се развијале кроз деценије и оне омогућавају да се изврши прорачун за добијање радних карактеристика пумпе као турбине. У најчешћем случају, ове методе као решење имају само тачку најбоље ефикасности.

У овом раду је приказано неколико постојећих метода, као и њихове међусобне разлике. Рад је структуиран тако да је, након увода, у другом поглављу рада дат преглед теоријских основа, док се у трећем поглављу описују методе за прерачунавање радних карактеристика. У четвртом поглављу је дат прорачун преко две одабране методе, које дају радне криве пумпе у турбинском режиму рада. Резултати су приказани у виду дијаграма, као зависност напора од протока и зависност снаге од протока. На основу тога, извршено је њихово међусобно поређење, са циљем сагледавања одступања у добијеним решењима за исте пумпе при примени различитих метода. На крају, у петом поглављу је дат закључак рада.

2. МЕТОДЕ

Како су пумпе као турбине почеле да се користе пре неколико деценија, многи научници су се бавили њиховим проучавањем. Данас имамо многобројне методе које се користе при прорачунима

Неке од метода које се користе, односе се само на тачку најбоље ефикасности пумпе и њено превођење у

турбински режим, док друге методе (које су доста ређе) омогућавају да се цела карактеристика пумпе прерачуна и прикаже како би изгледао њен рад када би се одабрана пумпа користила као турбина.

2.1. Добијање тачке најбоље ефикасности

Тачка најбоље ефикасности турбине представља радни режим где турбина остварује максимални степен ефикасности. Турбина тада ради са минималним губицима енергије. Одступање од ове тачке значи да турбина ради са превеликим или премалим оптерећењем и на тај начин се смањује њена ефикасност. Њена вредност се добија преко следећих формула:

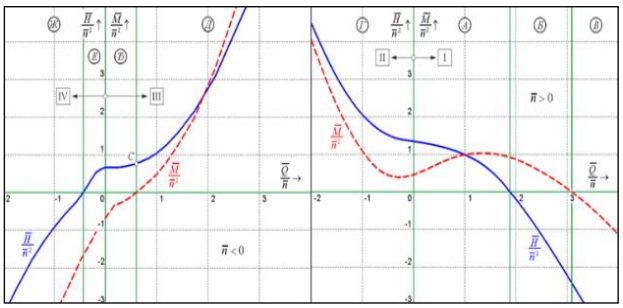
$$Q_t = \frac{Q_{bep}}{\eta_{bep}^{0,8}} \tag{1}$$

$$H_t = \frac{H_{bep}}{\eta_{bep}^{1,2}} \tag{2}$$

$$\eta_t = \eta_{bep} \tag{3}$$

2.2. Метода четвороквадратног дијаграма

Четвороквадратни дијаграм представља графички приказ свих радних режима једне пумпе у координантом систему у коме су осе дефинисане знаком и величином протока и брзине обртања, односно еквивалентно знаковима снаге и момента. На овај начин обухваћени су како номинални, тако и нестандардни и прелазни режими рада пумпе.
Значај четвороквадрантног дијаграма огледа се у томе што омогућава свеобухватну анализу понашања пумпи и турбина, укључујући покретање, заустављање, рад пумпе као турбине. Због тога овај дијаграм представља важан алат у анализи динамике система и пројектовању поузданих хидрауличних и хидроенергетских постројења.



Слика 1. Четвороквадратни радни дијаграм

Приликом прорачуна који се врше преко ове методе, користе се такозване значице. Значице представљају бездимензијске функционалне зависности између карактеристичних величина и радних параметара.
Коришћене су значице протока, напора, снаге и момента. Њихове формуле су:

$$\bar{\varphi} = \frac{\bar{Q}}{\bar{n}} \tag{4}$$

$$\bar{\psi} = \frac{\bar{H}}{\bar{n}^2} \tag{5}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\bar{P}}{\bar{n}^3} \tag{6}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\bar{M}}{\bar{n}^2} \tag{7}$$

Коришћење четвороквадратног дијаграма није најбоље решење пошто његове карактеристике иду у бесконачно. Због тога се уводе нови параметри и Сјутеров дијаграм.
Параметар F_t се рачуна као:

$$F_t = \frac{\bar{\lambda}}{1 + \bar{\varphi}^2} \tag{8}$$

Параметар F_h се рачуна као:

$$F_h = \frac{\bar{\psi}}{1 + \bar{\varphi}^2} \tag{9}$$

Номинални степен корисности за изабрану пумпу се може израчунати помоћу следеће формуле:

$$\eta_0 = \frac{g \cdot H_0 \cdot Q_0}{P_0} \tag{10}$$

Срећивањем датих израза преко зависности $F_h = F_h(\theta)$, $F_t = F_t(\theta)$ и n_{sq} и табеларних вредности, могуће је добити коначне формуле за израчунавање протока, напора и снаге које гласе:

$$Q = \bar{\varphi}\left(\frac{n}{n_0}\right) Q_0 \tag{11}$$

$$H = \bar{\psi}\left(\frac{n}{n_0}\right)^2 H_0 \tag{12}$$

$$P = \bar{\lambda}\left(\frac{n}{n_0}\right)^3 P_0 \tag{13}$$

Сада је могуће нацртати радну карактеристику пумпе и турбине, користећи ове формуле.

2.3. Чапалазова метода

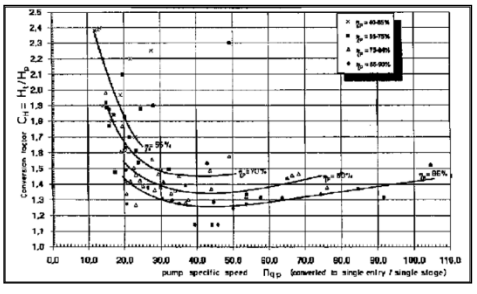
Ова метода користи скроз другачији принцип анализирања и конверзије пумпе у турбински режим рада. Најпре је неопходно одредити номиналну брзину турбине преко формуле:

$$n_{nt} = 1{,}03 n_{st} \tag{14}$$

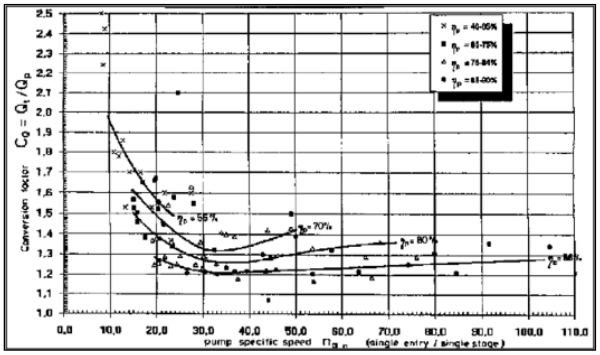
Како би се дошло до неопходних емпиријских фактора конверзије и карактеристика турбине, прво треба да се одреди специфичну брзину пумпе:

$$n_{qpi} = n_p \frac{\sqrt{\frac{Q_{np}}{1000}}}{H_{np}^{3/4}} \tag{15}$$

Фактор конверзије *CH* и *CQ* се добијају на основу специфичне брзине обртања пумпе и степена ефикасности. Њихове вредности се очитавају са дијаграма који су дати на слици 2 и слици 3.



Слика 2. Фактор конверзије CH [1]



Слика 3. Фактор конверзије CQ [1]

Напор и проток пумпе при брзини обртања турбине је могуће израчунати преко формула:

$$H_{np,np} = \left(\frac{n_p}{n_{nt}}\right)^2 H_{np,nt} \tag{16}$$

$$Q_{np,np} = \frac{n_p}{n_{nt}} Q_{np,nt} \tag{17}$$

Област конверзије за напор и проток се одређује у интервалима минималних и максималних вредности ових коефицијената. Минимална вредност се добија као 90% а максимална вредност као 110% одабраног фактора конверзије.

Након тога, потребно је одредити минималне и максималне вредности номиналних напора и протока. При номиналној брзини обртања пумпе се рачунају као:

$$H_{ntmax,np} = CH_{max} H_{np} \tag{18}$$

$$H_{ntmin,np} = CH_{min} H_{np} \tag{19}$$

$$Q_{ntmax,np} = CQ_{max} Q_{np} \tag{20}$$

$$Q_{ntmin,np} = CQ_{min} Q_{np} \tag{21}$$

При номиналној брзини обртања турбине, формуле добијају облик:

$$H_{ntmin,nt} = \left(\frac{n_{nt}}{n_p}\right)^2 H_{ntmin,np} \tag{22}$$

$$Q_{ntmin,nt} = \frac{n_{nt}}{n_p} Q_{ntmin,np} \tag{23}$$

$$H_{ntmax,nt} = \left(\frac{n_{nt}}{n_p}\right)^2 H_{ntmax,np} \tag{24}$$

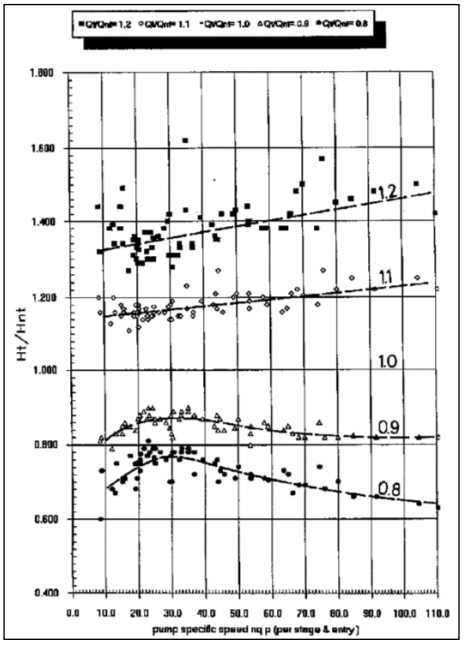
$$Q_{ntmax,nt} = \frac{n_{nt}}{n_p} Q_{ntmax,np} \tag{25}$$

Хидрауличка снага се такође рачуна у минималним и максималним интервалима. Вредности параметара унутар формуле за снагу се уносе за максимум или минимум, у зависности који се интервал рачуна

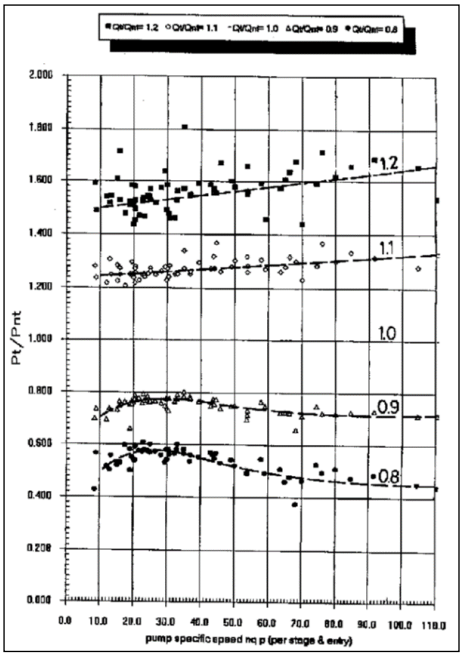
$$P_{ntmax,nt} = \frac{Q_{ntmax,nt}}{1000} g H_{ntmax,np} \left(\frac{\eta_{pmax}}{100}\right) \tag{26}$$

$$P_{ntmin,nt} = \frac{Q_{ntmin,nt}}{1000} g H_{ntmin,np} \left(\frac{\eta_{pmin}}{100}\right) \tag{27}$$

За добијање радних криви, неопходно је очитати вредности односа напора турбине и номиналног напора турбине (слика 4), као и однос протока турбине и номиналног протока турбине (слика 5)



Слика 4. Зависност односа напора турбине и номиналног напора турбине од специфичног броја обртања пумпе [1]



Слика 5. Зависност односа снаге турбине и номиналне снаге турбине од специфичног броја обртања пумпе [1]

Помоћу очитаних вредности и интерполација, могуће је нацртати радне карактеристике које приказују минималне и максималне вредности турбине.

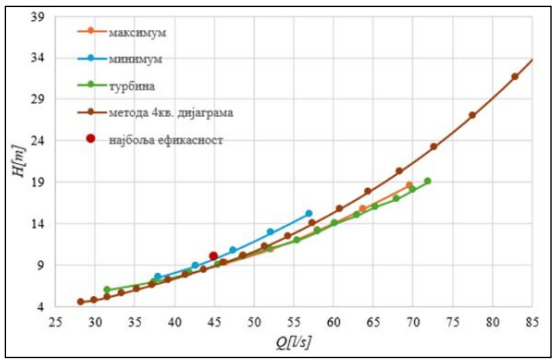
Тачност овог прорачуна се може проверити преко степена ефикасности. Ако су резултати минималног и максималног степена ефикасности исти, значи да је прорачун тачан. Формуле за добијање максималних и минималних вредности степена ефикасности су:

$$\eta_{tr/max,itr} = \frac{P_{tr/max,itr} \cdot 100}{\frac{Q_{tr/max,itr}}{1000} \cdot g \cdot H_{tr/max,itr}} \tag{28}$$

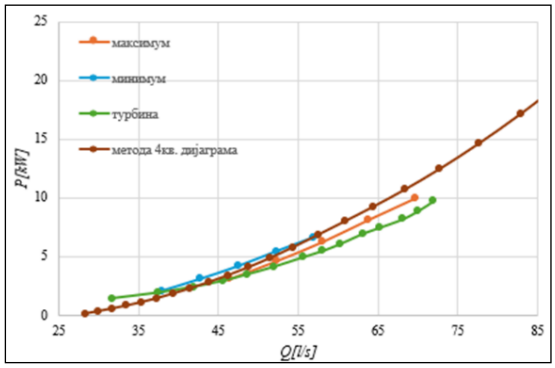
$$\eta_{tr/min,itr} = \frac{P_{tr/min,itr} \cdot 100}{\frac{Q_{tr/min,itr}}{1000} \cdot g \cdot H_{tr/min,itr}} \tag{29}$$

3. УПОРЕЂИВАЊЕ РЕЗУЛТАТА

Метода четвороквадратног дијаграма се више базира на сам прорачун и табеларне вредности за карактеристике пумпе. Чапалаз метода више користи дијаграме за добијање фактора конверзије и зависности односа напора турбине и номиналног напора турбине од специфичног броја обртања пумпе, као и добијање зависности односа снаге турбине и номиналне снаге турбине од специфичног броја обртања.
Када се упореде резултати, за конверзију пумпе KSB Etanorm 125-100-160y турбину, који су добијени помоћу ове две методе. На слици 6 и слици 7 се види да постоје одступања, али да она нису велика.

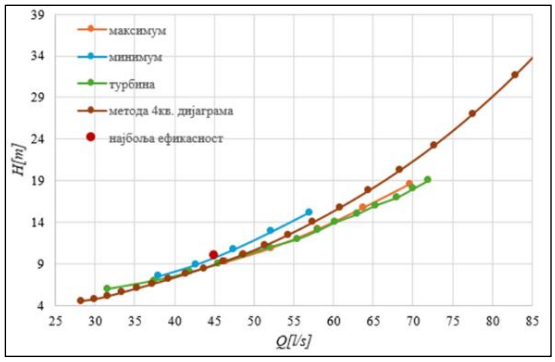


Слика 6. Упоређивање турбинских карактеристика

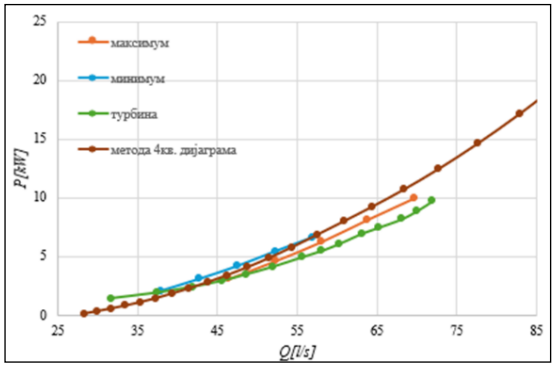


Слика 7. Упоређивање резултата снаге у односу на проток

Када се погледају резултати за пумпу KSB OMEGA 80-370A види се да нема велике разлике између одабраних метода. Сви резултати су у прихватљивим границама и испуњавају тражене услове. Упоређени резултати су приказани на слици 8 и слици 9.



Слика 8. Упоређивање турбинских карактеристика



Слика 9. Упоређивање резултата снаге у односу на проток

4. ЗАКЉУЧАК

Како снага хидроелектране опада, њена инвестициона вредност расте по инсталисаном киловату. Што је хидроелектрана већа, то значи да треба мање новца по киловату. Из тог разлога се показује да је код малих хидроелектрана, коришћење пумпи као турбина исплативије пошто се на тај начин смањује инвестициони фонд.
Овај рад је за циљ имао анализу проблема прерачунавања радних карактеристика центрифугалних пумпи у одговарајуће карактеристике у турбинском режиму рада. Детаљно су анализиране две методе које су се користиле за овај прорачун и примењене су на једној једностепеној и једној двострујној центрифугалној пумпи.
Добијени резултати су упоређени са доступним експерименталним подацима, при чему је уочено добро слагање, нарочито око оптималне тачке. Одступања се могу уочити код већих протока. Може се закључити да изабране методе задовољавају постављене услове и дају прихватљиву тачност када је у питању прерачунавање радних карактеристика.

5. ЛИТЕРАТУРА

[1] https://docs.aft.com/impulse/PATOperationAsATurbine.html (pristupljeno u martu 2026.)

[2] Chapallaz J. M., Eichenberger P. and Fischer. G, Manual on pumps used as turbines, 1992

[3] Chaudhry M. H., Applied Hydraulic Transients, Third Edition, 1979, 1987, 2014

[4] Vuković V., Tašin S., Uvod u hidropneumatsku tehniku, Fakultet tehničkih nauka 2006

[5] Øyvind A., Pump as Turbine (PAT), 2018

Кратка биографија:



Невена Тот Петин рођена је у Суботици 2001. год. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Енергетика и процесна техника одбранила је 2026.год.
Контакт:
nenetp2001@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 621.9
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36AM04Kljestan

Затезне карактеристике и биокомпатибилност нерђајућег челика *AISI* 302 у различитим физиолошким растворима

Tensile Properties and Biocompatibility of Stainless Steel AISI 302 in Different Physiological Saline Solutions

Николина Кљештан, Драган Рајновић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО

Кратак садржај – *Нерђајући челици представљају важне биоматеријале у изради ортопедских имплантата због добре комбинације механичких својстава и отпорности на корозију. У биолошком окружењу изложени су физиолошким растворима, што може утицати на њихову дуготрајну стабилност. У раду је анализиран утицај физиолошког, фосфатно - пуферисаног и Рингеровог раствора на механичке и површинске карактеристике челика AISI 302 након 3 и 21 дана излагања тим растворима. Добијени резултати показују да врста раствора и вријеме излагања утичу на понашање материјала, међутим уочене промјене нису увијек статистички значајне.*

Кључне речи: *нерђајући челик AISI 302, физиолошки раствори, механичке карактеристике, површинска храпавост*

Abstract – *Stainless steels are important biomaterials used in the production of orthopedic implants due to their favorable combination of mechanical properties and corrosion resistance. In a biological environment, they are exposed to physiological solutions, which may affect their long-term stability. This study analyzes the influence of physiological saline, phosphate-buffered, and Ringer's solution on the mechanical and surface characteristics of AISI 302 steel after 3 and 21 days of exposure to these solutions. The obtained results show that both the type of solution and exposure time influence the material behavior, however observed changes are not always statistically significant.*

Keywords: *stainless steel AISI 302, physiological solutions, mechanical properties, surface roughness*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Драган Рајновић, ред. проф.

1. УВОД

Биоматеријали представљају материјале намијењене за израду имплантата који замјењују или подржавају функције оштећених ткива, при чему њихова примјена значајно доприноси побољшању и продужењу живота пацијената. Они морају бити биокомпатибилни, механички поуздани и отпорни на корозију и хабање у сложеним биолошким срединама. Међу различитим класама биоматеријала, метални материјали се најчешће користе, а нерђајући челици су широко заступљени због повољног односа цијене и квалитета, добре обрадивости и задовољавајућих механичких својстава [1].

Корозија представља један од најзначајнијих деградационих процеса металних материјала, који утиче на њихову механичку стабилност, поузданост и вијек трајања. Код металних биоматеријала корозија се може јавити у више облика, укључујући општу (униформну) корозију и локализоване облике корозије, као што су галванска корозија, корозија усљед замора, питинг, корозија у зазорима, фретинг корозија и напонска корозија [2].

У условима људског организма, присуство тјелесних течности, протеина, соли и механичких оптерећења додатно убрзава корозионе процесе на површини металних имплантата, што може довести до нарушавања заштитног слоја, ослобађања металних јона и постепеног смањења његове механичке стабилности [1].

Како би се смањио утицај корозије на особине, хируршки имплантати се најчешће израђују од аустенитног нерђајућег челика, кобалт-хром легура и титанијума, при чему је челик AISI 316L широко заступљен због повољног односа цијене, доступности и задовољавајућих механичких својстава [1]. Његова аустенитна структура и низак садржај угљеника обезбјеђују добру отпорност на корозију и биокомпатибилност, што га чини погодним за медицинске примјене [3]. Ипак, у контакту са тјелесним течностима може доћи до локализованих облика корозије и ослобађања јона метала, што негативно утиче на стабилност и вијек трајања имплантата [4]. Кључну улогу у заштити има површински оксидни слој који омогућава репасивацију и смањује деградацију материјала [5].

Досадашња истраживања показују да аустенитни нерђајући челици 316L и 304L након продуженог излагања у PBS раствору испољавају смањење механичких карактеристика, при чему 316L задржава већу стабилност напона течења, затезне чврстоће и

дуктилности у односу на 304L, што се приписује стабилнијем пасивном слоју [6].
Испитивања у условима сланог спреја потврђују да корозија нема значајан утицај на Јунгов модул еластичности и затезну чврстоћу, али може довести до промјена пластичних својстава у зависности од микроструктуре и порозности материјала [7].
Истраживања у Рингеровом и физиолошком раствору указују да је агресивност медијума, посебно садржај хлорида, кључни фактор у иницирању локализоване корозије и деградације пасивног слоја. Такође је утврђено да синергијско дјеловање корозије и хабања значајно утиче на укупну деградацију материјала и може довести до смањења механичке стабилности имплантата [8].
Како су у условима примјене, имплантати изложени дјеловању физиолошких раствора који могу утицати и на површинске и на механичке карактеристике, што је од кључног значаја за њихову дуготрајну поузданост, у овом раду је извршено испитивање челика AISI 302, као једног из фамилије нерђајућих аустенитних челика, са циљем оцијене његове примјењивост у датим условима у медицинској пракси.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РАД

2.1. Испитивани материјал

За потребе експерименталног испитивања коришћен је аустенитни нерђајући челик AISI 302 према ASTM A276-04, који је приближно еквивалентан EN X10CrNi18-8 (1.4310) према EN 10088-2:2005.

2.2. Излагање узорака физиолошким растворима

За потребе истраживања коришћена су три различита раствора:
1. **Физиолошки раствор (ознака - *F*)** – састав 0,9 g NaCl у 1 l дестилованој води (0,9% раствор).
2. **Фосфатно пуферирани раствор (ознака - *P*)** – састав: 8 g NaCl, 0,2 g KCl, 1,44 g Na_2HPO_4, 8,1 g KH_2PO_4 у 1 l дестиловане воде.
3. **Рингеров раствор (ознака - *R*)** – састав: 8,6 g NaCl, 0,3 g KCl, 0,5 g $CaCl_2$, у 1 l дестиловане воде.

Узорци су били изложени наведеним растворима током 3 и 21 дана, ради испитивања утицаја времена излагања на њихове механичке и површинске карактеристике.

2.3. Механичко испитивање

Испитивање механичких особина нерђајућег челика обухватало је одређивање затезне чврстоће (R_m), конвенционалног напона течења ($R_{p0.2}$), процентуалног издужења (A) и сужења (Z). Испитивања су изведена на собној температури у складу са стандардом SRPS EN ISO 6892-1:2020, на универзалној машини за испитивање затезањем „ZDM 5/91“ (WEB, Leipzig).
Током испитивања, епрувете су биле постављене у PET цијев напуњену испитном течношћу, чиме су симулирани услови корозионог окружења, уз обезбјеђивање стабилних услова мјерења. Испитане су најмање три епрувете за сваки услов средине (суво и течности).

2.4. Испитивање храпавости површине – R_a параметар

Мјерење параметра храпавости R_a извршено је помоћу уређаја Mitutoyo Surftest SJ-210, који омогућава прецизно одређивање средње аритметичке храпавости профила, на основу превлачења стилусног сензора преко површине узорка.

2.5. Испитивање морфологије површине и хемијског састава продуката корозије

Испитивање морфологије површине и хемијског састава продуката корозије на површини извршено је скенирајућим електронским микроскопом (SEM) типа JEOL JSM-6460LV при радном напону од 25 kV, опремљеним са енергетски дисперзивним спектроскопом (EDS) INCA Oxford Instruments.

3. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

3.1. Механичке карактеристике

У циљу анализе утицаја корозионог окружења на механичке карактеристике аустенитног нерђајућег челика AISI 302, извршена су испитивања затезањем на сувим узорцима, као и након излагања у различитим физиолошким растворима, након 3 и 21 дана.
Криве затезања показују да узорци нерђајућег челика AISI 302 задржавају типично дуктилно понашање и након излагања у различитим растворима. Након 21 дана долази до благих промјена механичког понашања у односу на 3 дана, што се огледа у благом смањењу напона течења и затезне чврстоће, као и повећања укупног издужења. Међутим, облик криве остаје сличан, што указује на то да није дошло до значајне деградације механичких особина.
Квантитативни подаци добијени приликом затезања су сумирани у табели 1, тј. дате су средње вриједности напона течења ($R_{p0.2}$), затезне чврстоће (R_m), процентуалног издужења (A) и сужења (Z) за различите услове.
Из приказаних резултата може се уочити да излагање корозивним срединама доводи до благих промјена механичких карактеристика у односу на суво стање, при чему се најизраженије промјене односе на параметар издужења (A), који показује тенденцију повећања након излагања.

Табела 1. Средње вриједности механичких карактеристика

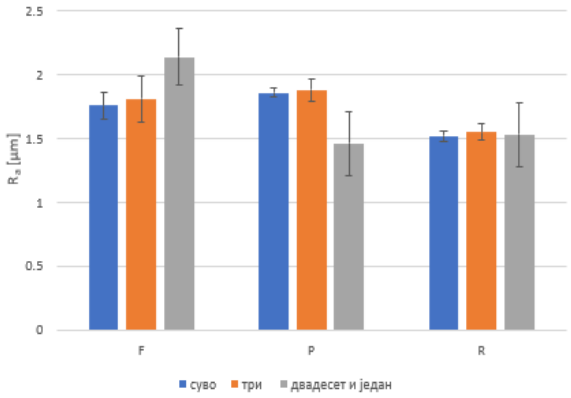
стање	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Z [%]
Суво	**763,36**	**881,04**	**34,36**	**71,29**
F-3 дана	731,30	895,20	42,08*	68,87
P-3 дана	743,43	895,72	41,51*	68,34
R-3 дана	763,73	905,54	40,96*	68,07
F-21 дана	727,06	894,15	42,98*	67,46
P-21 дана	740,69	893,12	42,24*	67,04
R-21 дана	735,28	894,40	42,59*	68,20

* значајна разлика *($p < 0,05$)* у односу на суво стање

С друге стране, напон течења ($R_{p0.2}$), затезна чврстоћа (R_m) и сужење (Z) су релативно стабилни са мањим варијацијама у зависности од врсте раствора и времена излагања.
Процјена статистичке значајности уочених разлика између испитиваних услова, извршена је једнофакторном анализа варијансе (АНОВА). Резултати анализе показали су да за параметре $R_{p0.2}$, R_m и Z није уочена статистички значајна разлика између различитих раствора и времена излагања *($p > 0,05$)* у односу на суво стање.
Насупрот томе, код параметра издужења (A) уочена је статистички значајна разлика *($p < 0,05$)*, и након 3 дана, и након 21 дана излагања, што указује на изражен утицај течног окружења на дуктилна својства материјала. Шта више, дошло је до повећања дуктилности, без сигнификантног губитка чврстоће.

3.2. Мјерење површинске храпавости

У циљу процјене утицаја корозионог окружења на површинске карактеристике испитиваног материјала, извршено је мјерење средње аритметичке храпавости површине (R_a) након излагања у различитим растворима, након 3 и 21 дана излагања, док је суво стање узето као референтно.
На слици 1 приказани су резултати у графичком облику.

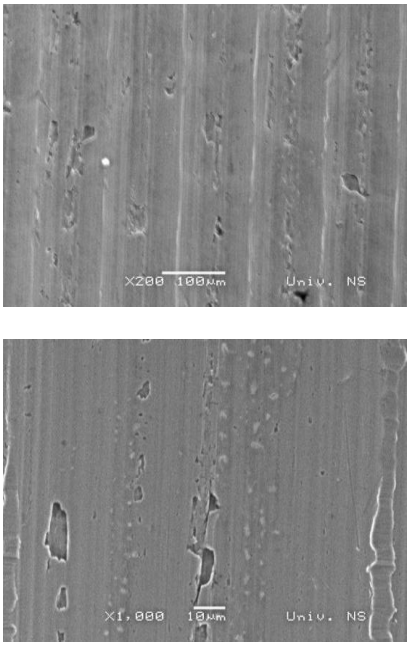


Слика 1. Средње вриједности Ra параметра храпавости површине након 3 и 21 дана излагања у различитим растворима

На приказаном дијаграму представљене су средње вриједности параметра Ra за узорке у сувом стању и након излагања у физиолошком (F), фосфатно-пуферисаном (P) и Рингеровом (R) раствору током 3 и 21 дана. Уочава се да се у физиолошком раствору (F) биљежи благи пораст храпавости након 21 дана у односу на 3 дана, док у фосфатно-пуферисаном раствору (P) долази до смањења Ra вриједности након дужег времена излагања. У Рингеровом раствора (R) промјене храпавости су минималне и уједначене током посматраног периода.
Резултати статистичке анализе (АНОВА) показали су да је уочена статистички значајна разлика само код узорака изложених фосфатно-пуферисаном раствору *($p < 0,05$),* док код физиолошког и Рингеровог раствора није уочена статистички значајна промјена храпавости површине *($p > 0,05$)*.

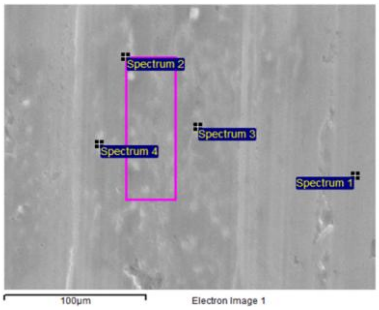
3.3. Морфологија површине - SEM и EDS анализа

Извршена је SEM/EDS анализа површине узорака након излагања у различитим растворима.
У циљу јасније и концизније презентације резултата, у даљем приказу биће детаљно приказани и анализирани резултати за узорке изложене фосфатно-пуферираном раствору, као репрезентативном медијуму, а који је имао и значајну разлику у храпавости површине између сувог стања и након 21 дана излагања. Резултати за преостале растворе су такође анализирани и показују сличне морфолошке карактеристике без значајних одступања.
На слици 2 приказане су SEM микрографије површине узорка након 21 дана излагања физиолошко-пуферисаном раствору, при увећањима од 200× и 1000×.



Слика 2. Површина узорака који су изложени фосфатно – пуферираном раствору у периоду од 21 дан при различитом увећању

На слици 2 (увећање 200×) уочљиви су трагови обраде стругањем у виду паралелних линија које доминирају површином. Између линија присутна су плитка неправилна удубљена настала као посљедица процеса обраде. Површина је генерално хомогена, без изражених знакова корозионих оштећења. Плитке удубине престављају зоне где је дошло до интензивног лепљења материјала за стругарски нож, интензивне пластичне деформације и коначног неправилног цепања материјала, после чега је остало удубљење.
На слици 2 (увећање 1000×) приказан је детаљнији приказ локалне површине узорка. Уочава се појава појединачних кристала сферног облика, што указује на њихово формирање услед вероватног таложења соли NaCl и KCl из раствора. У поређењу са узорцима у сувом стању, нису уочене промјене које би указивале на израженије корозино оштећење површине.
Испитивање хемијског састава површине и уочених кристала извршено је на области приказаној на слици 3, а резултати анализе дати су у табели 2.



Слика 3. Мјесто EDS анализе на површини узорка изложеног фосфатно - пуферисаном раствору

Табела 2. Резултати EDS анализе за означених мјеста на слици 3

Spectrum	Na	Si	Cl	K	Cr	Mn	Fe	Ni
Spectrum 1		0.47			17.64	2.17	70.99	8.74
Spectrum 2	0.67	0.37	0.25	0.04	17.42	1.78	70.67	8.80
Spectrum 3	4.68	0.39	2.11	0.36	16.77	1.66	65.83	8.19
Spectrum 4	1.64		0.82	0.09	17.42	2.01	69.44	8.58

EDS анализа потврђује присуство елемената карактеристичних за наслаге соли, пре свега натријума (Na) и хлора (Cl), као и калијума (K), што је у складу са кристалима уоченим на SEM снимцима и указује на таложење соли из раствора на површини.
На основу SEM и EDS резултата може се констатовати да излагање челика 302 у фосфатно-пуферисаном раствору у трајању од 21 дана није довело до значајне појаве оштећења површине у виду нових јамица, заобљења ивица плитких удубина, или настанка прслина које се шире од ивица удубина. Односно није дошло до уочљивог корозионог оштећења површине.

4. ЗАКЉУЧАК

На основу истраживања може се закључити да излагање аустенитног нерђајућег челика AISI 302 различитим физиолошким растворима (чисто физиолошком, фосфатно-пуферисаном и Рингеровом), у трајању од 3 и 21 дана, доводи до ограничених и углавном незнатних промјена његових механичких и површинских карактеристика.
Резултати механичких испитивања показују да напон течења, затезна чврстоћа и сужење задржавају стабилне вриједности, без статистички значајних разлика, док је за параметар издужења уочен одређени утицај течног окружења, односно долази до пораста вриједности издужења у свим случајевима.
Анализа храпавости указује на благе промјене параметра Ra у зависности од врсте раствора и времена излагања, при чему је статистички значајна разлика уочена само код узорака у фосфатно-пуферисаном раствору, где долази до смањења храпавости.
SEM и EDS анализа потврђују присуство површинских наслага соли (Na, Cl, K), насталих услед таложења из раствора, док нису уочени знаци изражене површинске деградације или корозионог оштећења.
На основу свих добијених резултата може се закључити да испитивани услови излагања не доводе до смањења механичких особина, значајне корозије, нити до нарушавања структурног интегритета челика AISI 302 у посматраном периоду.

5. ЛИТЕРАТУРА

[1] G. Manivasagam, D. Dhinasekaran, and A. Rajamanickam, “Biomedical Implants: Corrosion and its Prevention -A Review,” *Recent Patents on Corrosion Science*, pp. 40–54, Jun. 2010.

[2] P. S. Mileend, “Corrosion of bio-materials,” *International Journal of Metallurgical & Materials Science and Engineering (IJMMSE)*, vol. 10, no. 1, pp. 21-28, 2020.

[3] J. B. Park, “Biomaterials science and engineering,” *Plenum*, pp. 193–233, 1984.

[4] K. M. Ismail, A. Jayaraman, T. K. Wood, and J. C. Earthman, “The influence of bacteria on the passive film stability of 304 stainless steel,” *Electrochim. Acta*, vol. 44, pp. 4685–4692, 1999.

[5] A. Sadaqat, A.-R. Ahmad-Majdi, A. Syed Waqar, and H. Ghulam, “Biocompatibility and corrosion resistance of metallic biomaterial,” *Corrosion Reviews*, vol. 38, no. 5, pp. 381-402, 2020.

[6] M. Ali, N. K. F. Al-Asadi, and J. H. Mohmmed, “Corrosion-induced mechanical properties deterioration in 304L and 316L stainless steels under simulated physiological conditions: A comparative study,” *Advances in Science and Technology Research Journal*, vol. 19, no. 12, pp. 91–99, 2025.

[7] C. Barile, C. Casavola, and C. Pappalettere, “Corrosion effects on mechanical properties of sintered stainless steel,” *Procedia Structural Integrity*, vol. 5, pp. 195-201, 2017.

[8] R. Alessandro and D. S. Marco, “Experimental investigation on the bio-tribocorrosive behavior of Ti6Al4V alloy and 316 L stainless steel in two biological solutions,” Tribol. Int., vol. 10, 109033, pp. 1-13, 2023.

Кратка биографија:



Николина Кљештан, рођена 2001. г. у Зворнику. Дипломирала 2024. на Факултету техничких наука, смјер Производно машинство, и уписала мастер студије из Савремених технологија обликовања материјала.
Контакт: nikolinakljestan01@gmail.com



Др Драган Рајновић, ред. проф. ради на Факултету техничких наука од 2000.г., у уно: Материјали и технологије спајања, А специфична област интересовања му је микроскопија и испитивање материјала
Контакт: draganr@uns.ac.rs

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 621.311.2:550.822
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36AM05Gakovic

Могућност примене геотермалне енергије на систем даљинског грејања у Бечеју

Possibility of Applying Geothermal Energy to the District Heating System in Bečej

Игор Гаковић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Област – ЕНЕРГЕТИКА И ПРОЦЕСНА ТЕХНИКА

Кратак садржај – *У раду је анализирана могућност примене геотермалне енергије у систему даљинског грејања у општини Бечеј. Извршени су енергетски и технички прорачуни различитих варијанти интеграције геотермалног извора у постојећи топлификациони систем, укључујући примену гасних котлова, гасног мотора и топлотних пумпи. На основу добијених резултата сагледани су економски и еколошки ефекти примене геотермалне енергије и процењен њен допринос смањењу потрошње природног гаса у Бечеју.*

Кључне речи: *Геотермална енергија, даљинско грејање, Бечеј, топлотне пумпе, обновљива енергија*

Abstract – *In this paper, the possibilities of applying geothermal energy in the district heating system of Bečej are analyzed. Energy and technical analyses were carried out for different integration options of the geothermal source into the existing district heating network, including the use of gas boilers, gas engines, and heat pumps. Based on the obtained results, the economic and environmental effects of geothermal energy utilization were evaluated, as well as its potential contribution to reducing natural gas consumption in the Municipality of Bečej.*

Keywords: *Geothermal energy, district heating, Bečej, heat pumps, renewable energy*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био проф. др. Александар Анђелковић, ред. проф.

1. УВОД

У савременим енергетским системима све већи значај придаје се коришћењу обновљивих извора енергије, услед потребе за смањењем емисије штетних гасова и повећањем енергетске ефикасности. Геотермална енергија заузима значајно место међу обновљивим изворима захваљујући стабилности, доступности и могућности континуиране експлоатације током целе године [1].

Општина Бечеј, смештена у северном делу Србије у Панонском басену, располаже повољним геотермалним условима. На територији општине постоји неколико геотермалних бушотина, а систем даљинског грејања тренутно у потпуности зависи од природног гаса. Потреба за диверзификацијом извора топлоте, смањењем увозне зависности и испуњавањем климатских циљева намеће истраживање могућности интеграције локалних обновљивих ресурса [1].

У раду су анализиране могућности интеграције геотермалне енергије у постојећи систем кроз три варијанте: директно коришћење геотермалне воде, искоришћење издвојеног гаса у гасним котловима или гасном мотору, те примена топлотних пумпи. Анализа је заснована на реалним подацима геотермалних бушотина и постојећег система даљинског грејања у Бечеју, а укључује енергетски, технички, економски и еколошки аспект.

2. КАРАКТЕРИСТИКЕ ЛОКАЦИЈЕ

2.1. Геотермални потенцијал и бушотине

Подручје општине Бечеј карактерише значајан геотермални потенцијал као резултат повољних хидрогеолошких услова Панонског басена, са геотермалним градијентом преко 6°C/100 m. На територији Бечеја постоје три геотермалне бушотине. Бушотина ВчНТ-3/09, избушена 2009. године на западној обали реке Тисе, са производном температуром 66°C и протоком 20 l/s, представља главни предмет анализе у овом раду [5]. Кључни параметри свих бушотина приказани су у Табели 1.

Табела 1. Карактеристике термалних бушотина у Бечеју [5]

Бушотина	Вč-1/Н	Вč-2/Н	ВčНТ-3/09
Локација	кр. Флора	ОСЦ	зап. обала Тисе
Дубина (m)	503	1020	1047
Год. израде	1981	1985	2009
Проток (l/s)	11	17–28	20
Температура (°C)	33	63–63,3	66
Минерализација (g/l)	4,5	4,6	4,3
Садржај гаса (Nm^3/m^3)	Н.п.	1,86–2,14	1,92–2,23

2.2. Постојећи систем даљинског грејања

ЈП Топлана Бечеј управља системом са 919 прикључених потрошача (861 стамбени, 30 јавних институција, 28 пословних субјеката), грејаном површином 94.877 m^2 и инсталисаном снагом ≈ 18,6

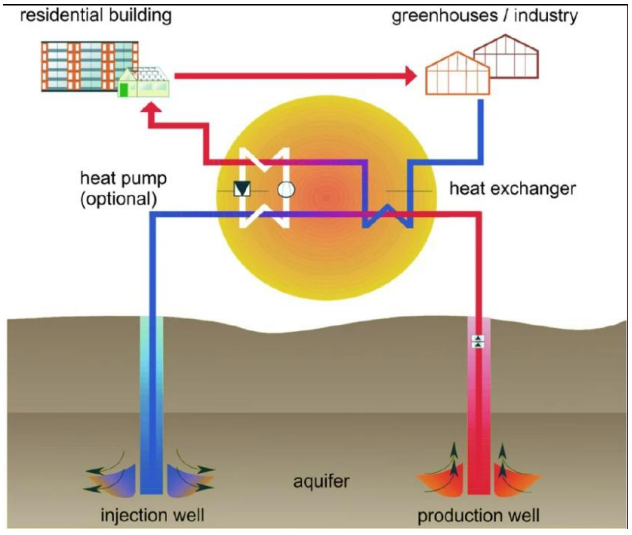
MW. Примарни температурни режим је 130/75°C, а секундарни 90/70°C. Систем поседује три топловодна котла, разгранату цевоводну мрежу са примарним и секундарним цевоводима, 165 топлотних подстаница са измењивачима топлоте и акумулационе резервоаре укупне запремине 3 × 180 m³ [5].

Грејна сезона у Бечеју траје просечно 180–200 дана, са рачунском спољашњом температуром −18°C. Максимално топлотно оптерећење јавља се у периоду децембар–фебруар. Систем у потпуности користи природни гас, а флуктуације цена енергената и потреба за декарбонизацијом покрећу истраживање алтернативних извора топлоте. Постојећа инфраструктура (цевоводна мрежа, топлотне подстанице, акумулациони резервоари) добра је полазна основа за интеграцију геотермалног извора без значајних додатних инвестиција у дистрибутивну мрежу.

3. АНАЛИЗА МОГУЋНОСТИ ПРИМЕНЕ

3.1. Doublet систем – принцип рада

Техничка реализација геотермалног система у Бечеју заснива се на doublet систему – производна и утисна бушотина. Слика 1 приказује принцип рада: геотермална вода се извлачи производном бушотином, предаје топлоту систему даљинског грејања преко измењивача топлоте, а затим реинјектује утисном бушотином у исти геолошки слој. Овакав затворени систем осигурава дугорочну одрживост геотермалног ресурса и спречава загађење подземних вода.



Слика 1. Принцип рада doublet геотермалног система са топлотном пумпом [5]

3.2. Топлотна снага геотермалног извора

За бушотину BčHT-3/09 (T = 65°C, ṁ = 20 kg/s) топлотна снага одређена је изразом:

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \; [W] \qquad (1)$$

Анализиране су две варијанте: варијанта 1 – хлађење воде на 20°C (ΔT = 45°C), $Q_1 = 20 \cdot 4180 \cdot 45 \approx 3{,}76$ MW, и варијанта 2 – хлађење на 37°C (ΔT = 28°C), $Q_2 = 20 \cdot 4180 \cdot 28 \approx 2{,}34$ MW. Варијанта 2 представља реалистичнији сценарио у условима постојећег температурног режима мреже (75/37°C на повратном воду).

Укупна расположива снага геотермалног система у различитим конфигурацијама приказана је у Табели 2. Видљиво је да ни у најповољнијем сценарију геотермални систем не може самостално покрити укупну инсталисану снагу постројења (18,6 MW), али може поуздано покрити базно оптерећење грејне сезоне.

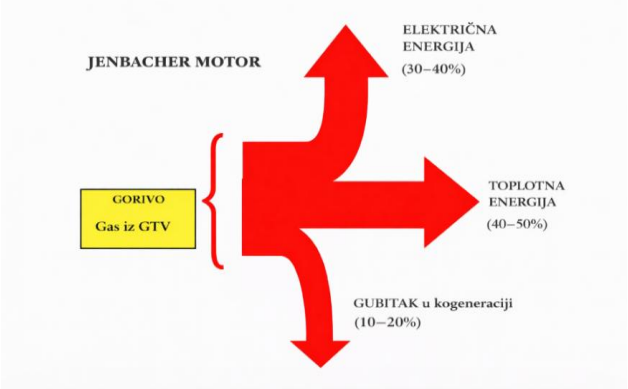
Табела 2. Расположива топлотна снага по варијантама

Конфигурација система	Вар. 1 (MW)	Вар. 2 (MW)
Геотермална вода	3,76	2,34
Геот. вода + гас котао	4,91	3,49
+ Топлотна пумпа	5,75	4,33

3.3. Искоришћење издвојеног гаса – когенерација

Геотермална вода садржи значајне количине метана (92,9%) које се издвајају у дегазатору. Применом гасних котлова (η = 0,90, Hd = 33.338 kJ/m³, qg ≈ 138 Nm³/h) добија се додатна снага Qg ≈ 1,15 MW. Укупна снага хибридног система: варијанта 1 – Quk = 4,91 MW; варијанта 2 – Quk = 3,49 MW.

Коришћење гасног мотора типа Jenbacher омогућава когенерацију – истовремену производњу топлотне и електричне енергије. Слика 2 приказује расподелу енергије у когенерацији: 30–40% горива претвара се у електричну, а 40–50% у топлотну енергију, уз свега 10–20% губитака. У летњем периоду мотор производи искључиво електричну енергију са расхладном кулом за хлађење .



Слика 2. Расподела енергије у когенерацији – Jenbacher мотор [5]

3.4. Примена топлотних пумпи

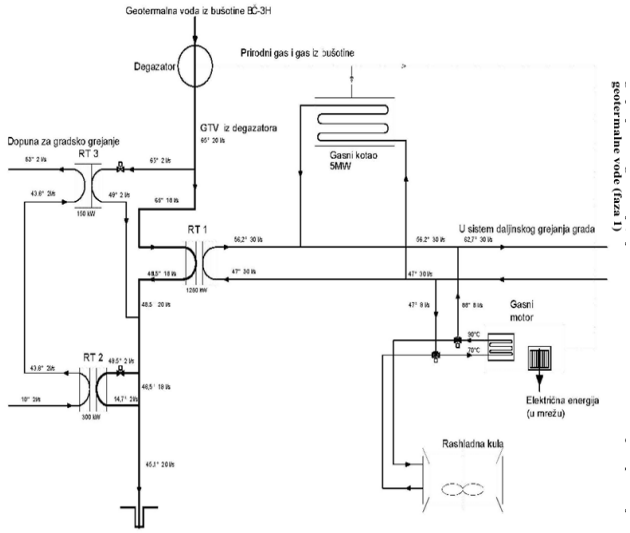
Топлотне пумпе омогућавају додатно снижење температуре геотермалне воде и искоришћење резидуалне топлоте. При хлађењу воде са 25°C на 15°C (ΔT = 10°C):

$$QДОД = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = 20 \cdot 4180 \cdot 10 \approx 0{,}84 \; MW \qquad (2)$$

Са вредностима COP = 3–5 за геотермалне примене, систем остварује 3–5 kW топлоте по 1 kW утрошене електричне енергије. Применом топлотне пумпе укупна снага система повећава се за приближно 20–25%, а пројектована потрошња електричне енергије износи ≈ 280 kWe.

3.5. Технолошка шема постројења

Слика 3 приказује технолошку шему предложеног постројења са свим компонентама. Геотермална вода из бушотине пролази кроз дегазатор, примарни измењивач топлоте RT1 (снага 1.250 kW) и опционо кроз топлотну пумпу. Допунски топловодни измењивачи RT2 (300 kW) и RT3 (150 kW) служе за прилагођавање температурног режима. Издвојени гас доводи се до гасног котла (5 MW) и гасног мотора са расхладном кулом. Систем у целини обезбеђује флексибилно управљање оптерећењем [5].

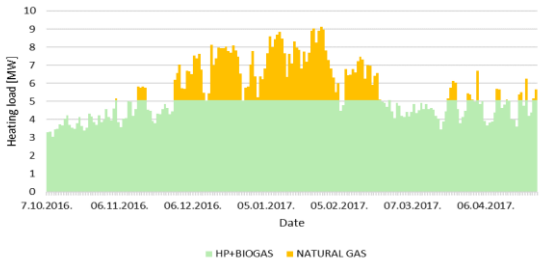


Слика 3. Технолошка шема геотермалног постројења у Бечеју [5]

4. ЕКОНОМСКА И ЕКОЛОШКА АНАЛИЗА

4.1. Топлотно оптерећење система

Слика 4. приказује дијаграм топлотног оптерећења система даљинског грејања током грејне сезоне 2016/2017. Јасно је видљива расподела покрића оптерећења: зелена зона (HP+BIOGAS) представља базно оптерећење које покрива геотермални систем са топлотним пумпама, а жута зона (NATURAL GAS) вршно оптерећење које се покрива природним гасом. Максимално оптерећење износи до 9 MW, а базно оптерећење покривено геотермалним системом просечно 4–5 MW.



Слика 4. Дијаграм топлотног оптерећења система грејања Бечеј [5]

4.2. Инвестиција и период повраћаја

Укупна процењена инвестиција у систем износи I ≈ 5–7 милиона €, са радним веком преко 25 година. Инвестиција обухвата: израду doublet бушотина (≈ 2–3 М€), надземно постројење са дегазатором и измењивачима (≈ 1–2 М€), когенерациону јединицу (≈ 0,5–0,8 М€), топлотну пумпу (≈ 0,3–0,5 М€) и интеграцију са постојећим системом (≈ 0,5 М€).

При раду од 3600 h/год, годишња производња топлотне енергије износи 12.564–17.676 MWh. Уз цену топлоте из гаса 56 €/MWh [5], годишње уштеде достижу U ≈ 703.584–942.300 €. Период повраћаја инвестиције: T = I/U ≈ 5–8 година. Додатна вредност произведене електричне енергије у когенерацији (гасни мотор, ≈ 350–500 kWe) побољшава финансијски резултат за додатних 80.000–120.000 €/год при цени електричне енергије 0,145 €/kWh.

Економска исплативост значајно зависи од кретања цена природног гаса. При расту цене гаса за 20%, период повраћаја инвестиције скраћује се на 4–6 година. Геотермална енергија представља дугорочну заштиту од волатилности цена енергената – нема директних трошкова горива за геотермални извор, а оперативни трошкови ограничени су на електричну енергију за пумпе и редовно одржавање.

4.3. Еколошки ефекти

Применом специфичног фактора емисије за природни гас (eCO_2 ≈ 0,202 t/MWh), процењено годишње смањење емисије CO_2 износи 2.538–3.570 t/год у зависности од варијанте. Поред тога, смањује се емисија NO_x и суспендованих честица, а геотермални систем не производи пепео нити чврсте отпатке. Примена doublet система са реинјекцијом охлађене воде у исти геолошки слој обезбеђује еколошки прихватљиво и дугорочно одрживо коришћење геотермалног ресурса, уз очување притиска у лежишту [3].

Пројекат је у складу са Директивом ЕУ о обновљивим изворима енергије (RED III), Националним акционим планом за ОИЕ Србије и Уговором о Енергетској заједници, по коме Србија треба да достигне 27% удела ОИЕ у финалној потрошњи до 2030. Геотермалне инсталације у општини Бечеј могу постати демонстрациони пројекат и подстицај за сличне иницијативе у суседним општинама Панонске низије.

4.4. Утицај на цену топлоте и сигурност снабдевања

Увођење геотермалне енергије, чија је маргинална цена производње значајно нижа у односу на природни гас, ствара услове за стабилизацију или снижење цене топлоте за крајње кориснике. Процењено смањење просечне цене топлоте износи 8–15% у зависности од варијанте и кретања цена природног гаса. Диверзификација извора топлоте такође повећава сигурност снабдевања – у случају поремећаја у снабдевању природним гасом, геотермални систем може самостално обезбедити базно грејање за значајан број прикључених потрошача.

Током фазе изградње процењује се ангажовање 60–80 радника, а у фази погона 8–12 стално запослених стручних лица. Развој геотермалних компетенција локалних стручњака отвара и могућности за примену геотермалне топлоте у процесима прераде, сушења, пластеничке производње и аквакултуре, коришћењем

воде нижих температура на излазу из главног система – чиме се остварује каскадно искоришћење ресурса.

4.5. Упоредна анализа варијанти и препоруке

На основу спроведених техничких и економских анализа могу се издвојити три основне варијанте хибридног геотермалног постројења у Бечеју, са различитим односом инвестиционих трошкова и остварених ефеката:

Варијанта А – Директно искоришћење геотермалне воде са гасним котлом: Најједноставнија и најмање инвестиционо захтевна опција (I ≈ 3–4 М€). Геотермална вода предаје топлоту преко примарног измењивача RT1, а издвојени гас сагорева у гасном котлу. Укупна снага износи 3,49–4,91 MW. Препоручује се као прва фаза имплементације, уз могућност даљег проширивања системом.

Варијанта Б – Геотермална вода са гасним мотором (когенерација): Уз нешто вишу инвестицију (I ≈ 4,5–5,5 М€), гасни мотор типа Jenbacher замењује гасни котао и омогућава истовремену производњу топлотне и електричне енергије. Посебна предност је флексибилност – у летњем периоду мотор производи искључиво електричну енергију са расхладном кулом, чиме се максимизује коришћење издвојеног гаса током целе године. Укупна топлотна снага је иста као у варијанти А, али је укупна искоришћеност горива виша.

Варијанта В – Потпуни хибридни систем са топлотном пумпом (препоручена): Највиша инвестиција (I ≈ 5–7 М€), али и највиши степен искоришћења геотермалног ресурса. Топлотна пумпа додатно снижава температуру геотермалне воде са 25°C на 15°C и преузима додатних 0,84 MW, чиме укупна снага достиже 4,33–5,75 MW. Овај приступ је оптималан са становишта дугорочне одрживости и енергетске ефикасности.

Кључни техничко-економски ризици пројекта укључују: пад капацитета бушотине услед таложења минерала у цевоводу, потребу за хемијским третирањем геотермалне воде, ATEX захтеве за руковање издвојеним метаном и потребу за специјалним опремом измењивача топлоте отпорних на корозивне минерале Панонског басена. Препоручује се поступна имплементација у фазама, са пажљивим мониторингом параметара лежишта.

4.6. Примери примене геотермалне енергије у свету

Геотермална енергија се успешно користи у системима даљинског грејања широм света, нарочито у земљама са повољним геолошким условима. Исланд је светски лидер – преко 90% стамбених објеката греје се геотермалном енергијом, а систем даљинског грејања у Рејкјавику снабдева преко 200.000 становника. Температура геотермалне воде у Рејкјавику износи 80–130°C, знатно виша него у Бечеју, али принцип doublet система са реинјекцијом је исти [2].

У оквиру Панонског басена – идентичног геолошког окружења као Бечеј – Мађарска бележи значајне резултате. Град Сегедин (170.000 становника) успешно је интегрисао геотермалну енергију у постојећи систем даљинског грејања, смањивши потрошњу природног гаса за преко 40%. У Француској, геотермални doublet системи у париском региону (температуре 56–85°C, дубине 1.500–2.000 m) раде поуздано преко пет деценија без значајног пада капацитета бушотина [4].

У Србији је геотермална енергија тренутно у почетној фази искоришћења, иако Панонски басен нуди значајан потенцијал. Општина Бечеј располаже повољнијим условима од многих европских локација које су већ успешно реализовале геотермалне пројекте. Искуства наведених земаља јасно указују на то да су кључни фактори успеха: детаљна хидрогеолошка истраживања, примена doublet система са реинјекцијом, фазна имплементација и дугорочни мониторинг параметара лежишта.

4.7. Утицај на енергетски биланс општине

Увођење геотермалне енергије директно смањује увозну зависност општине Бечеј од природног гаса. У оптималном сценарију (варијанта В са топлотном пумпом), геотермални систем може покрити 27–36% укупне годишње потребе за топлотном енергијом. Током просечних зимских дана, када је оптерећење умерено (5–7 MW), геотермални систем покрива базно оптерећење практично без употребе природног гаса.

Диверзификација извора топлоте повећава сигурност снабдевања потрошача. У случају поремећаја у снабдевању природним гасом, геотермални систем може самостално обезбедити базно грејање за значајан број прикључених стамбених објеката. Стабилност цена геотермалне енергије такође пружа заштиту корисницима – нема директних трошкова горива за геотермални извор, па цена произведене топлоте није изложена волатилности тржишта природног гаса.

Процењено смањење годишње потрошње природног гаса за грејање износи 1.260.000–1.770.000 Nm³/год, у зависности од варијанте. Уз просечну цену природног гаса од 0,80 €/Nm³, директна уштеда у набавци гаса износи 1,0–1,4 М€/год. Ово је значајно виша вредност у поређењу са уштедом на нивоу топлотне енергије, јер се рачуна разлика у трошковима горива а не у цени за крајњег корисника.

5. ЗАКЉУЧАК

Спроведена анализа показала је да геотермални потенцијал у Бечеју пружа реалну могућност унапређења система даљинског грејања. Расположива топлотна снага геотермалног извора (2,34–3,76 MW) уз додатак из издвојеног гаса (1,15 MW) и топлотних пумпи (0,84 MW) достиже укупно 4,33–5,75 MW, покривајући базно топлотно оптерећење током целе грејне сезоне.

Оптималан приступ подразумева хибридни систем у коме геотермална енергија покрива базно оптерећење, гасни котлови обезбеђују вршну снагу, а гасни мотор омогућава когенерацију у ванвандалном периоду. Примена топлотних пумпи додатно повећава искоришћење ресурса и укупни степен ефикасности система.

Економска анализа потврдила је исплативост пројекта са периодом повраћаја 5–8 година и годишњим

уштедама до 942.000 €. Еколошки ефекти – смањење емисије CO_2 за 2.500–3.600 t/год – чине овај пројекат усклађеним са циљевима декарбонизације енергетског сектора. Бечеј може постати модел одрживог коришћења геотермалне енергије у Панонском басену. Препоручује се израда детаљне студије изводљивости и изворишног истраживања пре доношења коначне инвестиционе одлуке.

ЛИТЕРАТУРА

[1] I. Stober, K. Bucher, Geothermal Energy – From Theoretical Models to Exploration and Development, Springer, Berlin, 2021.

[2] W. E. Glassley, Geothermal Energy – Renewable Energy and the Environment, CRC Press, Boca Raton, 2014.

[3] D. Gvozdenac, Obnovljivi izvori energije, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2010.

[4] J. W. Tester, S. L. Milora, Geothermal Energy as a Source of Electric Power, MIT Press.

[5] iC, CES, ENOVA, CONTEX ENERGY, Final Report – Bečej, 2023.

Кратка биографија:



Игор Гаковић рођен је у Новом Саду 1997. год. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Енергетике и процесне технике – Термотехнике одбранио је 2026.год.
Контакт:
igor.gakovic97@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 621.95
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36AM06Zekic

Анализа радијуса контуре реза применом методе одзивне површине

Analysis of the Cut Edge Contour Radius Using Response Surface Methodology

Марко Зекић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО

Кратак садржај – *Квалитет ласерског сечења у великој мери зависи од избора процесних параметара, који директно утичу на геометријску тачност обрађених делова. У овом раду анализиран је утицај брзине сечења, снаге ласера и притиска помоћног гаса на радијус контуре реза применом методе одзивне површине (RSM). Експериментална истраживања спроведена су на машини Glorystar GS4020 над челиком EN 10130. За планирање експеримената примењен је Box–Behnken дизајн, на основу којег је развијен математички модел процеса и анализиран утицај процесних параметара на радијус контуре реза. Добијени резултати омогућавају боље разумевање утицаја процесних параметара на радијус контуре реза и представљају основу за развој поузданих модела за предвиђање геометријске тачности процеса ласерског сечења.*

Кључне речи: *Ласерско сечење, радијус контуре реза, метода одзивне површине, моделовање процеса*

Abstract *– The quality of laser cutting largely depends on the selection of process parameters, which directly affect the geometric accuracy of machined parts. This paper investigates the influence of cutting speed, laser power, and assist gas pressure on the cut contour radius using Response Surface Methodology (RSM). Experimental research was conducted on a Glorystar GS4020 laser cutting machine using EN 10130 steel sheets. A Box–Behnken experimental design was applied to develop a mathematical model and analyze the influence of process parameters on the cut contour radius. The obtained results provide a better understanding of the influence of process parameters on the cut contour radius and establish a basis for developing reliable models for predicting the geometric accuracy of the laser cutting process.*

Keywords: *Laser cutting, cut contour radius, response surface methodology, process modelling*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Драган Родић.

1. УВОД

Ласер представља акроним од енглеског израза *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, што у преводу означава појачавање светлости стимулисаном емисијом зрачења. Захваљујући својим јединственим карактеристикама, као што су монохроматичност, кохерентност и висока усмереност зрака, ласерско зрачење може се фокусирати на веома малу површину, чиме се остварује изузетно велика густина енергије. Управо ове особине омогућиле су да ласерска технологија постане један од најзначајнијих алата у савременој производњи [1].

Током последњих неколико деценија ласерска технологија доживела је интензиван развој и нашла широку примену у различитим гранама индустрије. Посебан значај има у аутомобилској, ваздухопловној, електронској, медицинској и машинској индустрији, где се од производних процеса захтевају висока прецизност, поузданост и продуктивност. Захваљујући могућности аутоматизације и интеграције са CNC системима, ласерско сечење данас представља један од најзаступљенијих неконвенционалних поступака обраде материјала [2], [3].

Процес ласерског сечења заснива се на интеракцији високо концентрисаног ласерског зрака са материјалом, при чему долази до локалног загревања, топљења и делимичног испаравања материјала, док помоћни гас омогућава ефикасно уклањање растопљене масе из зоне обраде [4], [5]. Квалитет добијеног реза директно зависи од великог броја процесних параметара, међу којима се издвајају брзина сечења, снага ласера, притисак помоћног гаса, положај фокуса и карактеристике материјала који се обрађује [6], [7]. Неправилан избор ових параметара може довести до појаве различитих дефеката, као што су повећана храпавост површине, промена ширине реза, деформације и одступања од пројектоване геометрије.

Савремена производња поставља све веће захтеве у погледу геометријске тачности и поновљивости процеса. Поред класичних показатеља квалитета, као што су храпавост површине, ширина реза и термички утицана зона, све већи значај добијају локалне геометријске карактеристике сложених контура. Посебно је значајан радијус контуре реза, који представља један од показатеља способности процеса да верно репродукује пројектовану геометрију обратка. Одступања у вредности радијуса могу негативно утицати на функционалност и квалитет готовог производа, нарочито код компоненти сложене геометрије које се користе у индустријама са високим захтевима у погледу прецизности

Иако је област ласерског сечења интензивно истраживана, већина доступних радова усмерена је на анализу стандардних показатеља квалитета, као што су

храпавост површине, ширина реза и термички утицана зона. Са друге стране, анализа радијуса контуре реза као специфичне геометријске карактеристике још увек није довољно заступљена у литератури. Управо овај недостатак представља мотивацију за спровођење истраживања приказаног у овом раду.

Због сложености процеса и међусобне зависности великог броја параметара, јавља се потреба за применом савремених статистичких метода моделирања и оптимизације. У том контексту, метода одзивне површине (енг. Response Surface Methodology – RSM) представља један од најчешће коришћених приступа, јер омогућава истовремену анализу утицаја више параметара и развој математичких модела за описивање и предвиђање понашања процеса [6], [8].

Научни допринос овог рада огледа се у систематској анализи утицаја процесних параметара на радијус контуре реза као специфичан показатељ геометријске тачности при ласерском сечењу. За разлику од већине досадашњих истраживања, у којима су доминантно анализирани глобални показатељи квалитета, у овом раду посебна пажња посвећена је локалним геометријским одступањима у зонама промене правца кретања ласерске главе.

Основни циљ истраживања је да се применом методе одзивне површине утврди и квантитативно опише утицај кључних процесних параметара на радијус контуре реза, као и да се развије математички модел за предвиђање посматране излазне величине. Полазна хипотеза рада заснива се на претпоставци да постоји статистички значајна зависност између изабраних улазних параметара процеса и посматране излазне величине, те да је могуће развити поуздан математички модел за предвиђање радијуса контуре реза унутар испитиваног опсега параметара [6], [8].

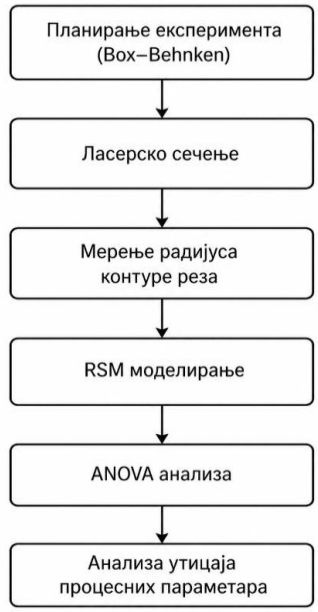
2. МАТЕРИЈАЛИ И МЕТОДЕ

Експериментална истраживања спроведена су на CNC машини за ласерско сечење Glorystar GS4020, опремљеној влакнастим ласером максималне снаге 1,5 kW. Као материјал обратка коришћен је хладно ваљани нискоугљенични челик EN 10130 дебљине 5 mm. Због добре пластичности, уједначене микроструктуре и широке индустријске примене, овај материјал представља погодан избор за анализу утицаја процесних параметара на геометријску тачност ласерског сечења.

За анализу утицаја процесних параметара на радијус контуре реза примењена је метода одзивне површине (*Response Surface Methodology – RSM*). За планирање експеримената коришћен је Box–Behnken експериментални план са три фактора на три нивоа. Овај приступ омогућава ефикасно испитивање појединачних и интеракционих утицаја параметара уз релативно мали број експеримената.

Као улазни параметри усвојени су брзина сечења, снага ласера и притисак помоћног гаса, док је као излазни параметар посматран радијус контуре реза. Укупно је реализовано 17 експерименталних огледа применом Box–Behnken експерименталног плана. Нивои варирања посматраних параметара дефинисани су на основу технолошких могућности машине и резултата претходних истраживања и приказани су у Табели 1. Ток спроведеног истраживања приказан је на Слици 1.

Радијус контуре реза представља један од показатеља геометријске тачности процеса, јер описује одступање стварно добијене контуре од пројектоване геометрије. Након извођења експеримената, мерење је извршено применом оптичког микроскопа Euromex NexiusZoom EVO.



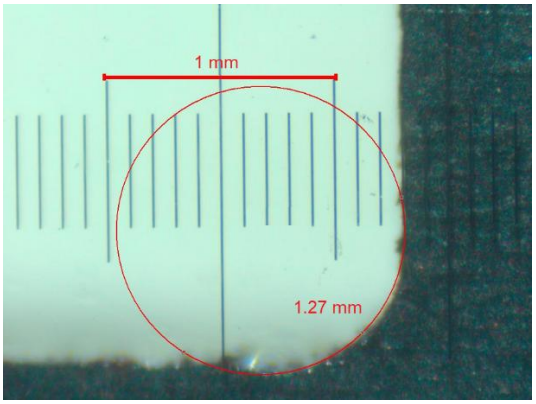
Слика 1. Методолошки ток спроведеног истраживања

Приказани опсези параметара омогућавају анализу њиховог појединачног и међусобног утицаја на радијус контуре реза, као и развој математичког модела за предвиђање посматраног одзива.

Табела 1. Врсте система за обраду сигнала

Фактор	Јединица	-1	0	1
Брзина сечења	m/min	0.9	1.1	1.3
Снага ласера	%	80	84	88
Притисак гаса	bar	1.0	1.1	1.2

Начин дефинисања и мерења радијуса контуре приказан је на Слици 2.



Слика 2. Шематски приказ дефинисања и мерења радијуса контуре реза.

На основу Box–Behnken експерименталног плана реализовано је 17 огледа. Комбинације улазних параметара и добијене вредности радијуса контуре реза приказане су у Табели 2.

Табела 2. Експериментални план и добијене вредности радијуса контуре реза

Редни број	Улазни фактори			Радијус
	v [m/min]	P_w [%]	P [bar]	r (mm)
1.	0.90	80.00	1.10	1.02
2.	1.30	80.00	1.10	0.82
3.	0.90	88.00	1.10	1.18
4.	1.30	88.00	1.10	0.92
5.	0.90	84.00	1.00	0.94
6.	1.30	84.00	1.00	0.76
7.	0.90	84.00	1.20	1.26
8.	1.30	84.00	1.20	1.05
9.	1.10	80.00	1.00	0.92
10.	1.10	88.00	1.00	1.04
11.	1.10	80.00	1.20	1.15
12.	1.10	88.00	1.20	1.27
13.	1.10	84.00	1.10	0.88
14.	1.10	84.00	1.10	0.93
15.	1.10	84.00	1.10	0.9
16.	1.10	84.00	1.10	0.95
17.	1.10	84.00	1.10	0.89

Добијени експериментални резултати коришћени су за развој математичког модела другог реда применом методе одзивне површине. Анализа података спроведена је у софтверском пакету Design-Expert (DX7), при чему су примењене ANOVA анализа, контурни дијаграми и тродимензионалне површине одзива ради анализе утицаја процесних параметара и одређивања моделирање и анализа процеса

3. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

На основу експерименталних резултата развијен је математички модел другог реда применом методе одзивне површине. За анализу података коришћен је софтверски пакет Design-Expert (DX7), а након *Fit Summary* анализе усвојен је квадратни модел као најпогоднији за описивање зависности између процесних параметара и радијуса контуре реза.

Добијени модел показао је високу статистичку значајност ($p < 0{,}0004$), што указује да постоји јака зависност између улазних параметара и посматране излазне величине. Развијени регресиони модел омогућава предвиђање вредности радијуса контуре реза унутар испитиваног опсега параметара.

Анализом коефицијената модела уочено је да повећање брзине сечења доводи до смањења радијуса контуре реза, док повећање снаге ласера и притиска помоћног гаса узрокује његов пораст. Овакво понашање може се објаснити различитим интензитетом уноса топлотне енергије и начином уклањања растопљеног материјала из зоне обраде.

Статистичка значајност развијеног модела испитана је применом анализе варијансе (ANOVA). Резултати показују да је квадратни модел статистички значајан, при чему вредност F-фактора износи 38,74, док је p-вредност мања од 0,0001. То указује на веома малу вероватноћу да су добијени резултати последица случајне грешке.

ANOVA for Quadratic model

Response 1: Radijus

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	0.3425	9	0.0381	38.74	< 0.0001	significant
A-Brzina sečenja	0.0903	1	0.0903	91.95	< 0.0001	
B-Snaga lasera	0.0313	1	0.0313	31.82	0.0008	
C-Pritisak gasa	0.1431	1	0.1431	145.71	< 0.0001	
AB	0.0009	1	0.0009	0.9164	0.3703	
AC	0.0002	1	0.0002	0.2291	0.6468	
BC	0.0000	1	0.0000	0.0000	1.0000	
A^2	0.0003	1	0.0003	0.3282	0.5846	
B^2	0.0295	1	0.0295	30.07	0.0009	
C^2	0.0432	1	0.0432	43.95	0.0003	
Residual	0.0069	7	0.0010			
Lack of Fit	0.0035	3	0.0012	1.36	0.3741	not significant
Pure Error	0.0034	4	0.0009			
Cor Total	0.3494	16				

Factor coding is **Coded**.
Sum of squares is **Type III - Partial**

The **Model F-value** of 38.74 implies the model is significant. There is only a 0.01% chance that an F-value this large could occur due to noise.

P-values less than 0.0500 indicate model terms are significant. In this case A, B, C, B^2, C^2 are significant model terms. Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant. If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

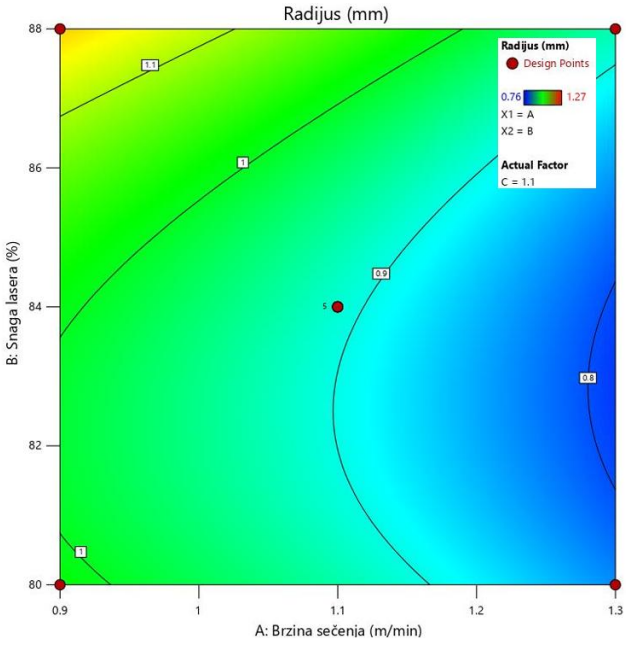
The **Lack of Fit F-value** of 1.36 implies the Lack of Fit is not significant relative to the pure error. There is a 37.41% chance that a Lack of Fit F-value this large could occur due to noise. Non-significant lack of fit is good -- we want the model to fit.

Слика 3. ANOVA анализа квадратног модела

Анализа појединачних фактора показала је да брзина сечења, снага ласера и притисак помоћног гаса имају статистички значајан утицај на радијус контуре реза. Највећи утицај остварује притисак помоћног гаса, што потврђује његова највећа вредност F-фактора. Са друге стране, интеракциони чланови нису показали статистички значајан утицај, док квадратични чланови указују на присуство нелинеарних зависности између параметара процеса и посматраног одзива.

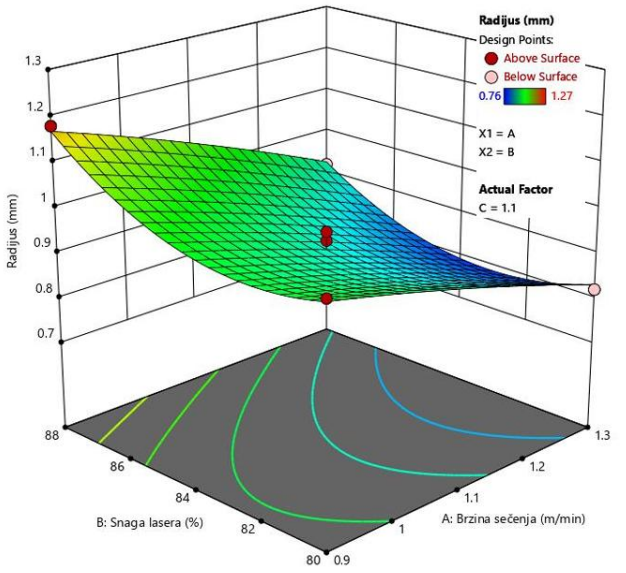
Вредности коефицијената $R^2 = 0{,}9803$, Adj $R^2 = 0{,}9550$ и Predicted $R^2 = 0{,}8256$ указују на добро слагање модела са експерименталним резултатима и задовољавајућу способност предвиђања. Такође, вредност параметра *Lack of Fit* није статистички значајна, што потврђује адекватност развијеног модела. У циљу бољег разумевања утицаја процесних параметара формирани су контурни дијаграми и тродимензионалне површине одзива.

На Слици 4 приказан је контурни дијаграм који илуструје утицај процесних параметара на радијус контуре реза. Уочава се да промене брзине сечења, снаге ласера и притиска помоћног гаса значајно утичу на посматрани одзив, при чему различите комбинације параметара доводе до различитих вредности радијуса контуре реза.



Слика 4. Контурни дијаграм утицаја процесних параметара на радијус контуре реза

На Слици 5 приказана је тродимензионална површина одзива која представља зависност радијуса контуре реза од процесних параметара. Приказана површина омогућава детаљније сагледавање нелинеарних зависности и промена посматраног одзива унутар испитиваног опсега параметара. Добијени резултати потврђују да развијени математички модел адекватно описује понашање процеса ласерског сечења.



Слика 5. Тродимензионални приказ зависности радијуса контуре реза од процесних параметара

Добијени резултати су у сагласности са доступним истраживањима из литературе [2,4], у којима је показано да процесни параметри имају значајан утицај на геометријску тачност ласерски изведених контура. Посебно се издваја значај контроле топлотног уноса, јер он директно утиче на стабилност процеса и квалитет добијеног реза.

Ова истраживања показују да метода одзивне површине представља поуздан алат за моделирање процеса ласерског сечења, јер омогућава ефикасну анализу утицаја процесних параметара и развој математичких модела уз релативно мали број експерименталних испитивања.

4. ЗАКЉУЧАК

У овом раду анализиран је утицај процесних параметара ласерског сечења на радијус контуре реза применом методе одзивне површине. Истраживање је спроведено на материјалу EN 10130, при чему су као улазни параметри разматрани брзина сечења, снага ласера и притисак помоћног гаса.

На основу спроведених експерименталних истраживања и статистичке анализе развијен је математички модел другог реда који омогућава предвиђање вредности радијуса контуре реза унутар испитиваног опсега параметара. Добијени модел показао је високу статистичку значајност и добро слагање са експерименталним резултатима.

Резултати су показали да сва три процесна параметра имају значајан утицај на радијус контуре реза, при чему је највећи утицај остварио притисак помоћног гаса. Уочено је да повећање брзине сечења доводи до смањења радијуса контуре реза, док повећање снаге ласера и притиска помоћног гаса узрокује његов пораст.

Применом методе одзивне површине успешно је развијен математички модел који омогућава анализу и предвиђање радијуса контуре реза унутар испитиваног опсега процесних параметара. Добијени резултати потврђују да RSM представља ефикасан алат за анализу и моделирање процеса ласерског сечења.

Практични значај истраживања огледа се у могућности примене развијеног модела при избору оптималних параметара обраде, чиме се може унапредити геометријска тачност производа, смањити потреба за накнадном обрадом и повећати ефикасност производног процеса.

У будућим истраживањима могуће је проширити анализу укључивањем додатних процесних параметара, различитих врста материјала и савремених метода машинског учења ради даљег унапређења предикције и оптимизације процеса ласерског сечења.

5. ЛИТЕРАТУРА

[1] W. M. Steen and J. Mazumder, “Laser Material Processing”, 4th ed., London, Springer, 2010.

[2] М. Мадић, “Математичко моделирање и оптимизација процеса ласерског сечења применом метода вештачке интелигенције”, Докторска

дисертација, Машински факултет, Универзитет у Нишу, Ниш, 2013.

[3] G. E. P. Box and D. W. Behnken, “Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables”, Technometrics, Vol. 2, No. 4, pp. 455-475, 1960.

[4] M. Madić and M. Radovanović, “Application of RCGA-ANN Approach for Modeling Kerf Width and Surface Roughness in CO_2 Laser Cutting of Mild Steel”, Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 25, No. 6, pp. 1189-1200, 2014.

[5] J. Powell, “CO_2 Laser Cutting”, Berlin, Springer, 1993.

[6] J. C. Ion, “Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application”, Oxford, Butterworth-Heinemann, 2005.

[7] D. Petring, “Laser Cutting”, in LIA Handbook of Laser Materials Processing, Orlando, Laser Institute of America, 2001, pp. 135-158.

[8] A. K. Dubey and V. Yadava, “Laser Beam Machining – A Review”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 48, No. 6, pp. 609-628, 2008.

[9] S. H. Dahotre and N. B. Harimkar, “Laser Fabrication and Machining of Materials”, New York, Springer, 2008.

[10] D. Schuöcker, “Handbook of the EuroLaser Academy”, London, Chapman & Hall, 1998.

[11] M. Madić, M. Radovanović and M. Trajanović, “Optimization of CO_2 Laser Cutting Process Using Response Surface Methodology”, Journal of Production Engineering, Vol. 17, No. 1, pp. 97-100, 2014.

[12] L. Tong, C. C. Su and C. T. Wang, “The Optimization of Multi-Response Problems in the Taguchi Method”, International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. 14, No. 4, pp. 367-380, 1997.

Кратка биографија:

Марко Зекић рођен је у Угљевику 2001. године. Дипломирао је на Факултету техничких наука у Новом Саду, на смеру Производно машинство, 2024. године. Мастер рад из области Производног машинства – „Анализа радијуса контуре реза применом методе одзивне површине“, одбранио је 2026. године.
Контакт: zekic@uns.ac.rs

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 658.8:004
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36BE41Colak

Систем електронског плаћања заснован на микросервисној архитектури

Electronic payment system based on microservice architecture

Дарие Чолак, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – РАЧУНАРСТВО И АУТОМАТИКА

Кратак садржај – *У овом раду је описано пројектовање, имплементација и примена система за електронско плаћање заснованог на модерној микросервисној архитектури у облаку. Имплементацијом овог систем посебан акценат се ставља на обраду трансакција путем више метода плаћања, укључујући плаћање банковном картицом, криптовалутама, Paypal налогом и QR кодом. Иницијатор трансација у овом систему електронског плаћања је онлајн веб продавница. За потребе продукције систем је мигриран на Amazon Web Services (AWS) платформу.*

Кључне речи: *систем електронског плаћања, микросервиси, транскација, AWS*

Abstract – *This paper describes the design, implementation, and deployment of an electronic payment system based on a modern cloud-based microservices architecture. Through the implementation of this system, particular emphasis is placed on processing transactions via multiple payment methods, including credit card payments, cryptocurrencies, PayPal accounts, and QR codes. The initiator of transactions in this electronic payment system is an online web store. The system was migrated to the Amazon Web Services (AWS) platform for production.*

Keywords: *electronic payment system, microservices, transaction, AWS*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Срђан Вукмировић, ред. проф.

1. УВОД

Системи електронских плаћања представљају једно од најдинамичнијих подручија савремене ИТ индустрије. Глобални раст е-трговине, мобилних апликација и дигиталних финансијских услуга створио је потражњу за системима који морају бити високо доступни, сигурни, скалабилни и способни да симултано обрађују трансакције, од класичних банковних картица до савремених криптовалута. Традиционални монолитни приступи таквих система показао се незадовољавајуће када се суочавају са захтевима модерног тржишта, највише у погледу еластичности, независног скалирања компоненти и брзог увођења нових функционалности.

Посебна пажња током развоја посвећена је фази продукције, седам незвисних микросервиса мигрирани су на *AWS* платформу. Сваки од микросервирса поседује своју сопствену базу података, поред тога кориснички (*frontend*) интерфејс поседују три микросервиса.

2. АРХИТЕКТУРА СИСТЕМА

Имплементирани систем електронксог плаћања је пројектован као дистрибуирани систем са јасно раздвојеним слојевима одговорности. На највишем нивоу, његова архитектура се састоји од три концептуална слоја: корисничког слој (*frontend)*, позадинског слој (*backend*) и слој за перзистенцију података. Кориснички слој имплементиран је у *React* окружењу. За имплементацију *backend* микросервиса коришћен је *ASP.NET Core*, док *Microsoft SQL Server* континуирано бележи податке.

Расподела микросервиса:

- *Telecom webshop* – веб продавница оператера за телекомуникације који иницира плаћање, комуницира са остатком система путем *API Gateway*-а.
- *API Gateway* - централна улазна тачка за све захтеве, имплементира рутирање.
- *Payment Service Provider* (*PSP*) - кординише ток плаћања и баласирање система (*load balancing*).
- *Bank* сервис - комбинација корисничког (*frontend)* и позадинског слој (*backend*) за банкарски портал.
- *Payment Card Center* (*PCC*) - посреднички сервис (*middleware*) који омогућава транскације између две различите банке,
- *PayPal* сервис – служи за интегрисање са *PayPal* платрформом.
- *Coin* сервис – служи за интегрисање са *CoinPayments* платрформом.

Сваки позадински (*backend*) сервис поштује принцип једне базе по сервису (*databse per service*), што значи да ниједан сервис не приступа директно бази података другог сервиса. Све информације које један

сервис треба од другог прибављају се искључиво кроз дефинисане *API* позиве. Овај приступ, познат као лабава спрега (loose coupling), осигурава да промена шеме базе података једног сервиса не захтева измене на другим сервисима.

2.1. Теоријска основа

Микросервисна архитектура (*microservices architecture*) је приступ развоју софтвера у којем се апликација структурира као скуп малих, независно распоређених сервиса, од којих сваки имплементира специфичну функционалност, комуницира са другим сервисима путем добро дефинисаних *API*-ја и управља сопственим подацима. Систематизацијом карактеристика микросервисне архитектуре, истичу се следеће кључне особине [1]:

- Организација око пословних способности - сваки сервис енкапсулира једну пословну област (банковно плаћање, *PayPal* интеграција, плаћање криптовалутом).
- Децентрализовано управљање подацима - сваки сервис поседује и контролише своју базу података.
- Независно постављање - сервис се може ажурирати, скалирати и рестартовати без утицаја на остале сервисе.
- Отпорност на отказ (*Fault Tolerance*) - систем мора бити способан да настави рад када један или више сервиса постане недоступно.

У савременом контексту, архитектура система за обраду картичних плаћања темељи се на концепту четворостране шеме (*four-party scheme*), у којој учествују: купац (власник картице), продавац, банка продавца (*acquirer bank*) и банка купца (*issuer bank*) [2].

2.2. Технологије

У имплементацији система електроског плаћања су коришћене следеће технологије:

- *ASP.NET Core* - вишеплатформских (*cross-platform*) *framework* отвореног кода (*open-source*), намењен развоју модерних *cloud*-оријентисаних веб апликација, развијен од стране *Microsoft*-а.
- *React* - *JavaScript* библиотека отвореног кода (*open-source*) за изградњу корисничких интерфејса, коју је развио *Meta* (*Facebook*) [3].
- *Microsoft SQL Server* - релациони систем за управљање базама података (*RDBMS*) компаније *Microsoft* [4].
- *Entity Framework Core (EF Core)* - објектно-релациони мапер (*object-rational mapper*) за приступ бази података.
- *HashiCorp Consul* – механизам за динамичку регистрацију и проналажење сервиса у мрежи.
- *Ocelot* - *.NET* библиотека отвореног кода (*open-source*) која имплементира образац *API Gateway* за потребе микросервисне архитектуре [5].
- *Docker* - платформа за контејнеризацију апликација [6].

2.3. Ток плаћања

Централни пословни процес система електронског плаћања јесте ток обраде плаћања. Постоје четири основе варијанте овог тока, у зивности која метода плаћања је избарана. Оно сто је заједничко свим методама је иницијални корак који се одвија у *PSP* -у. Плаћање картицом банке одвија се у следећим корацима, прво купац у *Telecom webshop*-у бира жељени пакет и иницира плаћање. Друго *Telecom webshop* шаље захтев *PSP* сервису путем *API Gateway*-а, наводећи износ и валуту трансакције. Треће, *PSP* генерише јединствени идентификатор трансакције, купац бира начин плаћања картицом банке и *PSP* прослеђује купца на страницу за унос података картице. Четврто, купац уноси податке картице (број, име власника картице, датум истека, CVV код). Пето, врши се прелиминарна валидација података картице и прослеђује захтев за ауторизацијом *PCC* сервису. Шесто, *PCC* сервис идентификује банку издаваоца на основу *BIN* кода картице и прослеђује захтев одговарајућем банковном сервису (*BankOne* или *Bank* Two). Седмо, *Bank* сервис проверава стање рачуна, доступна средства и врши дедукцију износа трансакције. Осмо, резултат ауторизације (одобрено/одбијено, ауторизациони код) враћа се истим путем. Девето, *PSP* бележи резултат трансакције и обавештава *Telecom webshop* о исходу. На крају, купац се преусмерава на страницу која представља листу пакета на које се претплатио. Овај ток плаћања важи у случају када банка купца и банка продавца се разликују. У случају када су банке исте, долази до интерног преноса новца и тада се *PCC* сервис не користи. Поред класичног плаћања картицом, имплементирано је плаћање *QR* кодом. Купац може у својој мобилној апликацији банке да отвори плаћање *IPS QR* кодом и скенира *QR*. Када купац одабере *PayPal* као методу плаћања, *PSP* преусмерава захтев ка *PayPal* сервису, који конструише захтев према *PayPal REST API*-ју. *PayPal* враћа *URL* за ауторизацију. Након што купац ауторизује плаћање у свом *PayPal* налогу, *PayPal* шаље повратни позив (*callback*) на *PayPal* сервис, затим даље иде на *PSP*, који потврђује трансакцију и евидентира резултат. За плаћања криптовалутама, *Coin* сервис генерише јединствену *crypto* адресу за сваку трансакцију. Купцу се приказује *QR* код са адресом и износом у одређеној криптовалути. Сервис прати *blockchain* за долазне трансакције на генерисаној адреси и након потврде (*confirmation*) обавештава *PSP* о успешности плаћања.

3. МИКРОСЕРВИСИ

У имплементираном систему електронског плаћања јасно су раздвојене одговорности сваког микросервиса, сваки микросервис покрива тачно одређену пословну функционалност и независно се развија, тестира и поставља. У наставку су детаљно описани сви микросервиси који чине систем, њихове

одговорности и начин на који се уклапају у целокупни платни ток.

3.1. *Telecom* сервис

Telecom сервис покрива три области одгворности. Прва најважнија област је управљањем претплатама и инцијализација плаћања према *PSP* сервису. Друга је управљањем корисницима, корисници се региструју и пријављују, а при успешној пријави добијају *JWT* токен који корсите за приступ заштићеним ресурсима. Трећа област је управљање листом пакета, оператор дефинише понуду телеком пакета. Ток плаћања на *Telecom* сервису одвија се у две фазе. Када купац одабере пакет и покрене куповину са *frontend*-а, претплата се одмах креира у бази са привременим статусом, а затим се иницира трансакција према *PSP* - у који преузима контролу над током плаћања. Након што *PSP* заврши обраду и пошаље повратну информацију о исходу, *Telecom* сервис ажурира статус претплате, активира је у случају успешног плаћања или је означава као неуспешну.

3.2. *PSP* сервис

PSP сервис је централна координациона компонента читавог система, једини посредник између трговца (*Telecom webshop*-а) и свих доступних платних сервиса. Свака трансакција у систему, без обзира на методу плаћања, обавезно пролази кроз *PSP*. Када *Telecom* иницира плаћање, *PSP* валидира продавца, креира трансакцију са јединственим идентификатором и преусмерава купца на *PSP frontend* за одабир методе. Након одабира, *PSP* проналази одговарајући *plugin*, мења статус трансакције у "обрада" и делегира даље обраду том *plugin*-у. Трансакција пролази кроз дефинисани животни циклус, од чекања, преко обраде, до једног од коначних стања, успешно завршена, неуспешна и отказана. Након што платни сервис заврши обраду, шаље повратни позив *PSP* -у са резултатом. *PSP* проналази трансакцију, ажурира њен статус и уколико је плаћање успешно, асинхроно обавештава *Telecom* да активира претплату.

3.3. *Bank* сервис

Bank сервис имплементира пословну логику банке и покреће се у две независне инстанце , *BankOne* и *BankTwo*, поседује и свој *frontend*. Свака од банака користи засебну *SQL Server* базу података. Инстанца која се покреће контролисана је од стране *environment* варијабле, што значи да се исти бинарни код базе покреће за обе банке, а разлика је искључиво у конфигурацији. Овај приступ демонстрира како се хоризонтално скалирање једног сервиса може остварити чистом конфигурисањем параметара без икаквог дуплирања кода. У оквиру *Bank* сервиса имплементирано је *QR* код плаћање.

3.4. *PCC* сервис

Ток обраде међубанкарског плаћања одвија се у неколико корака. *Bank* сервис банке продавца шаље захтев *PCC* сервису када утврди да картица не припада њеном *BIN* опсегу. *PCC* евидентира трансакцију, проналази банку купца из базе по *BIN* коду и прослеђује комплетан захтев купчевој банци. Банка купца проверава стање рачуна, одобрава или одбија трансакцију и враћа одговор са сопственим идентификатором поруџбине и са временском ознаком. *PCC* тај одговор обрађује и саље назад банци продавца.

3.5. *Coin* сервис

Coin сервис је микросервис задужен за интеграцију система са платном мрежом базираном на криптовалутама. Сервис користи *CoinPayments* платформу као посредника за обраду крипто трансакција и библиотеке *NBitcoin* и *QRCoder* за генерисање *coin* адреса и *QR* кодова. Сервис имплементира детерминистички систем генерисања *coin* адреса заснован на *HD* (*Hierarchical Deterministic*) *wallet* принципу.

3.6. *PayPal* сервис

За једнократна плаћања, сервис креира поруџбину као заузету (*capture*), што значи да се средства резервишу тек у тренутку када корисник одобри плаћање, а не пре тога. Одговор *PayPal* сервера садржи листу *link*-ова, од којих сервис извлачи *approve* линк и враћа га клијенту. Корисник бива преусмерен на *PayPal* страницу за одобравање, а након што потврди плаћање, врши се заузеће поруџбине, *PayPal* тада терети корисников рачун и трансакција се сматра завршеном.

4. *AWS* ИНФРАСТРУКТУРА

Постовка система електронског плаћања у фазу продукције реализован је на *Amazon Web* сервису. Комбинујући *EC2* инстанце за микросервисе и *RDS* за управљање базама података, систем се репрезентује у *cloud* инфраструктури. Прелазак са локалног окружења на *cloud* инфраструктуру захтевало је низ прилагођавања конфигурација, али није захтевало промене у изворну коду сервиса. Једини сервис који је наставио сам локалним извршавањем је *Telecom.*

4.1. AWS EC2

Amazon Elastic Compute Cloud (*Amazon EC2*) је централни рачунарски сервис платформе *Amazon Web*, који омогућава изнајмљивање виртуелних сервера у облаку [7]. Тип *EC2* инстанце која је искоришћена за потребе овог пројекта је *t3.micro* і она се покреће на *Ubuntu AMI.* Регион на којем су подизане *EC2* инстанце је Франкфурт. За потребе продукције коришћена је стабилна *IP* адреса, статичке *IPv4* адресе које се трајно резервишу на *AWS* налогу и могу се у било ком тренутку прикључити или одвојити. Две *EC2* инстанце унутар исте *VPC* мреже комуницирају директно путем *IP* адресе кроз *AWS* мрежу.

4.2. AWS RDS

Amazon Relational Database Service (*Amazon RDS*) је сервис релационих база података у *cloud*-у који аутоматизује административне задатке као што су интегрисање софтвера базе података, примена *patch*-ева, прављење резервних копија, праћење рада и опоравак од грешака [8]. Пиликом креирања *RDS* инстанце, *AWS* нуди аутоматско конетковање са одговарајућом *EC2* инстанцом. За потребе овог

система електронског плаћања одабран је *RDS Microsoft SQL Server*. За продукциона окружења *RDS* нуди *Multi-AZ* конфигурацију у којој се аутоматски креира *standby* реплика у другој зони доступности унутар исте регије. Будући да овај систем електронског плаћања у локалном контерјнеру користи *Entity Framework Code-First* приступ, процес подизања локалне контејнерске базе на *RDS* се своди креирање празне *RDS* инстанце. Поред тога потребно је променити конекциони *string* у *environment* варијаблама *Docker* контејнера, након чега сервис при првом покретању аутоматски примењује све миграције на празну *RDS* инстанцу и креира комплетну шему базе података.

5. МЕРЕЊЕ ЛАТЕНЦИЈЕ

За мерење *end-to-end* латенције сваког платног тока коришћен је *.NET Stopwatch* механизам који прати један захтев кроз све микросервисе од *Telecom* сервиса до финалног одговора. Свака метода плаћања мерена је кроз 10 узастопних мерења у контролисаним условима, а приказане вредности представљају просек добијених резултата. Важно је напоменути да измерене вредности обухватају целокупан ток, од тренутка иницијализације плаћања до пријема финалног статуса, укључујући време корисничке интеракције са интерфејсима.

Табела 1. Резултати мерења

Метода плаћања	**Време (s)**
QR плаћање	50
PayPal плаћање	70
Картично плаћање	270
Coin плаћање	420

5.1. Анализа резултата

Време *QR* плаћања приказано у табели 1, представља најбржи метод плаћања, генерише се *QR* код према *NBS IPS* стандарду, корисник скенира код помоћу мобилне апликације и потврђује трансакцију. Измерено време је очекивано уз претпоставку да је корисник спреман са отвореном апликацијом. *PayPal* време од 70 секунди је реална за корисника који је већ аутентификован у *PayPal* сесији у *browser*-u, у случају потребе за пријавом време би било знатно дуже. Картично плаћање показује време ручног уноса комплетних података картице, број картице (16 цифара), име власника, датум истека и *CVV* код. Плаћање криптовалутама је очекивано најспорији ток, време од око 420 секунди потребно је за потврду трансакције на *LTCT* тестној мрежи и како би систем добио нотификацију од стране *CoinPayments* платформе.

6. ЗАКЉУЧАК

Примена микросервисне архитектуре показала се као права одлука у домену система електронског плаћања. Сваки сервис могао се тестирати и развијанти независно, отказ једног сервиса није утицао на остале делове система. Пребацивање локалних *Docker* слика кроз *Docker Hub* на *AWS* платформу покзао се као ефикасан приступ и осигурало је конзистентност података. Кроз израду овог система, показало се да за развој финансијксих апликација, права је одлука одабир микросервисне архитектуре у комбинацији са *AWS* платформом. Даљи развој система могао би бити увођење *message broker*-а као што су *Apache Kafka* ili *RabbitMQ* који би побољшао отпорност система на краткотрајне отказе, због чувања порука у реду (*queue*). Увођење система за праћење *Grafana* пружио би бољи увид у перформансе система у фази продукције.

7. ЛИТЕРАТУРА

[1] S. Newman, *Building Microservices*: *Designing Fine-Grained Systems*, 2nd ed. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2021.

[2] D. S. Evans and R. Schmalensee, *Paying with plastic: the digital revolution in buying and borrowing*. MIT Press, 2004.

[3] A. Banks and E. Porcello, *Learning React: Modern Patterns for Developing React Apps*. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2020.

[4] https://learn.microsoft.com/en-us/sql/sql-server/what-is-sql-server (pristupljeno u junu 2026.)

[5] C. de la Torre, *Reference Application: .NET Microservices: Architecture for Containerized .NET Applications*, 4th ed. Redmond, WA, USA: Microsoft Corporation, 2020.

[6] https://docs.docker.com/get-started/docker-overview (pristupljeno u junu 2026.)

[7] https://docs.aws.amazon.com/AWSEC2/latest/UserGuide/concepts.html (pristupljeno u junu 2026.)

[8] https://docs.aws.amazon.com/AmazonRDS/latest/UserGuide/Welcome.html (pristupljeno u junu 2026.)

Кратка биографија:



Дарие Чолак рођен је у Панчеву 1998. године. Уписао је Факултет техничких наука 2017. године, смер Примењено софтверско инжењерство. Уписао је мастер студије на студијском програму Рачунарство и аутоматика.
Контакт:
colakdarie@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 004.8:371.26
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36BE42Josipovic

Оптимизација питања за квизове уз помоћ вештачке интелигенције

Optimization of Quiz Questions Using Artificial Intelligence

Милош Јосиповић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – РАЧУНАРСТВО И АУТОМАТИКА

Кратак садржај – *У овом раду представљена је web апликација за креирање и решавање квизова која интегрише могућности вештачке интелигенције у образовни процес. Посебан акценат стављен је на аутоматско генерисање питања за квизове помоћу вештачке интелигенције, чиме се значајно убрзава и поједностављује процес њихове припреме. Поред тога, имплементиране су и додатне функционалности засноване на вештачкој интелигенцији, са циљем унапређења наставног процеса, побољшања квалитета учења и повећања ефикасности рада како наставника, тако и ученика.*

Кључне речи (три до пет): *вештачка интелигенција, оптимизација, образовни процес, квиз*

Abstract – *This paper presents a web application for creating and taking quizzes that integrates artificial intelligence into the educational process. Particular emphasis is placed on the automatic generation of quiz questions using AI, significantly accelerating and simplifying the quiz preparation process. In addition, several AI-powered functionalities have been implemented with the aim of enhancing the teaching and learning experience, improving educational outcomes, and increasing the efficiency of both teachers and students.*

Keywords: (three to five): *artificial intelligence, optimization, educational process, quiz*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Срђан Вукмировић, ред. проф.

1. УВОД

Креирање квалитетних питања за едукативне квизове захтева знање из предметних области, педагошко искуство и значајно време. Традиционални приступ подразумева да наставник осмисли и ручно формулише свако питање, дефинише понуђене одговоре и дефинише тачан одговор за дато питање. Овај процес је временски захтеван и подложан грешкама, посебно приликом креирања већег броја питања.

Напредак у области вештачке интелигенције, а посебно великих језичких модела, отворио је могућност аутоматизације овог процеса. Модели попут *GPT-4.1* способни су да на основу кратког описа теме генеришу питања различитих типова, процењују ниво тежине и идентификују потенцијалне проблеме у формулисању питања. Ове способности могу значајно убрзати креирање образовног садржаја.

Наведене способности ће бити представљене у посебно за то креираној апликацији *Kvizio*. Осим приказа могућности вештачке интелигенције у овом контексту, биће извршена упоредна анализа приступа са употребом вештачке интелигенције за креирање квизова и без ње.

2. УВОД У ВЕШТАЧКУ ИНТЕЛИГЕНЦИЈУ

Вештачка интелигенција представља област рачунарских наука која се бави развојем система способних да обављају задатке који традиционално захтевају људску интелигенцију, попут разумевања језика, препознавања образаца, доношења одлука и генерисања садржаја. Нагли напредак у овој области током последње деценије, поготово развој великих језичких модела заснованих на трансформер архитектури, отворио је могућности примене које су до недавно биле незамисливе: од аутоматског превођења и писања кода до генерисања образовног садржаја и пружања персонализоване помоћи корисницима у реалном времену [1].

2.1. Историјат развоја вештачке интелигенције

Вештачка интелигенција као научна дисциплина формално је установљена 1956. године на Дартмут конференцији, на којој је група истраживача, предвођена Џоном Макартијем, први пут употребила овај термин и дефинисала област чији је циљ креирање машина способних да симулирају аспекте људске интелигенције [2]. Корени идеје сежу и даље од тада, већ 1950. године Алан Тјуринг предложио је чувени Тјурингов тест као критеријум за процену интелигенције машине [3].

Развој вештачке интелигенције кроз деценије обележен је наизменичним периодима ентузијазма и стагнације, познатим као „*AI* зиме“. То су периоди разочарења и губитка финансирања услед пада интересовања за област због недостигнутих очекивања [1].

Кључни преокрет у модерној ери вештачке интелигенције десио се 2012. године када је мрежа *AlexNet* заснована на дубоким конволуционим неуронским мрежама драстично побољшала резултате

на *ImageNet* такмичењу у препознавању слика [4]. Овај успех покренуо је лавину истраживања и инвестиција у област дубоког учења.

2.2. Велики језички модели

Прекретницу у области обраде природног језика представио је рад „*Attention is All You Need*“ који је увео трансформер архитектуру. Овај рад је објављен 2017. године и написан је од стране осам научника и инжењера запослених у компанији *Google.* Трансформер архитектура заснована је на механизму пажње, који сваком токену (речи или подречи) у низу дозвољава да директно „обрати пажњу“ на сваки други токен, без обзира на растојање у низу. Ово омогућава паралелну обраду читавог улазног низа и ефикасно моделовање контекста [5].
GPT (*Generative Pre-trained Transformer*) је серија великих језичких модела које развија компанија *OpenAI.* Модели су тренирани на огромним корпусима текста, са циљем предвиђања следећег токена у низу. Повећањем количине података за обуку и броја параметара модела, *GPT* модели показују способност разумевања контекста, генерисања кохерентног текста и извршавања широког спектра задатака без експлицитног додатног тренирања за сваки појединачни задатак.
GPT-4 представља значајно унапређење у односу на претходне генерације модела, са бољим разумевањем сложених упита, већом тачношћу одговора и способношћу решавања комплекснијих задатака [6].

2.3. Промптно инжењерство

Промптно инжењерство је дисциплина која се бави обликовањем улазних захтева ка језичким моделима са циљем добијања жељених излаза.
Кључни елементи ефикасног *prompt*-а укључују:

- Системска порука – инструкција која дефинише улогу модела, тон, језик и општа ограничења
- Јасна спецификација излазног формата – језички модели могу генерисати излаз у *JSON*, *XML*, *Markdown* или обичном тексту. Експлицитним навођењем очекиваног формата у одговору значајно се повећава поузданост обраде одговора у аутоматизованим системима.
- *Few-shot* примери – навођење једног или више примера жељеног понашања у самој инструкцији помаже моделу да разуме тачна очекивања без потребе за финим подешавањем.
- Ограничења и забране – експлицитно навођење шта модел не сме да ради смањује вероватноћу нежељених излаза [7].

2.4. Примена вештачке интелигенције у образовању

Примена вештачке интелигенције у образовању представља интердисциплинарну област која проучава употребу технологија вештачке интелигенције у циљу унапређења процеса учења, наставе и евалуације знања [8].

Савремени системи вештачке интелигенције користе се за аутоматску евалуацију и оцењивање знања, укључујући писање одговора и пружање непосредних повратних информација. Поред тога, генеративни модели вештачке интелигенције омогућавају аутоматско генерисање образовних материјала, питања за проверу знања, сажетака и додатних објашњења, чиме се смањује оптерећење наставника и повећава доступност образовних ресурса [9].
Истраживања показују да персонализоване повратне информације и адаптивни приступи учењу могу позитивно утицати на ангажовање ученика, мотивацију и образовне исходе. Због тога се ове технологије све чешће интегришу у савремене образовне платформе као подршка учењу и континуираном праћењу напретка ученика [10].

3. *KVIZIO* АПЛИКАЦИЈА

3.1. Идеја и инспирација

Апликација је креирана у слободно време као хоби а инспирација је дошла због жеље за учењем о могућностима интеграције вештачке интелигенције у пројекте, те је тако створена идеја за израду мастер рада на поменуту тему.

3.2. Коришћене технологије

У реализацији софтверског решења за овај рад коришћене су следеће технологије и алати:

- *ASP.NET Core* – радно окружење отвореног типа које је развила компанија *Microsoft*, а користи се за развој *web* апликација.
- *Entity Framework Core* – објектно-релациони мапер за *.NET* који омогућава рад са релационим базама података коришћењем објеката уместо директног писања *SQL* упита. У пројекту је коришћен *Code-First* приступ који омогућава аутоматско управљање шемом базе путем миграција.
- *SQL Server Express* – бесплатан систем за управљање релационим базама података компаније *Microsoft.* Изабран је због једноставне интеграције са осталим *Microsoft* технологијама.
- *JSON Web Token (JWT)* – стандард за безбедан пренос података између клијента и сервера у облику дигитално потписаног токена. У пројекту је коришћен за реализацију *stateless* аутентификације и заштиту *API* ресурса.
- *AutoMapper* – библиотека која аутоматизује мапирање између објеката различитих типова. Његова примена смањује количину понављајућег кода и поједностављује конверзију између ентитета и *DTO* објеката.
- *React – JavaScript* библиотека за развој корисничких интерфејса заснованих на компонентама. У пројекту је коришћен за имплементацију клијентског дела апликације и изградњу динамичког корисничког интерфејса.
- *Material-UI (MUI)* – библиотека *React* компоненти заснована на *Material Design*

принципима. Омогућава брзу израду конзистентног и респонзивног корисничког интерфејса коришћењем готових компоненти.
- *Recharts* – *React* библиотека намењена визуелизацији података кроз графиконе.
- *Axios* – *JavaScript* библиотека за слање *HTTP* захтева и комуникацију са *REST API* сервисима.
- *OpenAI API* – омогућава приступ напредним моделима вештачке интелигенције за обраду и генерисање природног језика. Употребљен је за аутоматско генерисање питања за квизове и друге функционалности вештачке интелигенције.
- *Docker* – платформа за развој и извршавање апликација у изолованим контејнерима. Користи се за поједностављење развоја, дистрибуције и покретања комплетне апликације у различитим окружењима.

3.3. Архитектура апликације

Kvizio је реализован као вишеслојна *web* апликација заснована на клијент-сервер архитектури. Серверска страна излаже *RESTful API*, док клијентска страна користи тај *API* за преузимање и приказ података кориснику. Оваква архитектура обезбеђује јасно раздвајање одговорности и омогућава независни развој и скалирање сваке од тих страна.
Апликација се састоји од три основна слоја:

1. Клијентска страна (*frontend*) – *React* апликација која се извршава у прегледачу корисника. Одговорна је за приказ корисничког интерфејса, управљање локалним стањем и комуникацију са серверским *API*-јем.
2. Серверска страна (*backend*) – *ASP.NET Core Web API* који прима *HTTP* захтеве, обрађује пословну логику и комуницира са базом података и спољашњим сервисима.
3. База података - *SQL Server Express* који трајно чува све податке система: кориснике, квизове, питања, одговоре, резултате и логове интеракција са *AI* системом.

4. ИНТЕГРАЦИЈА ВЕШТАЧКЕ ИНТЕЛИГЕНЦИЈЕ

Централна тема овог рада је интеграција вештачке интелигенције у систем за управљање квизовима, са циљем оптимизације квалитета питања и унапређења искуства учења.

4.1. Архитектура слоја вештачке интелигенције

Сва комуникација са *OpenAI API* сервисом централизована је унутар сервиса *AIQuizService*. Сваки позив ка *OpenAI API* сервису обликује се као *chat completion* захтев који садржи поруке:

- Системска порука – дефинише улогу модела и глобална ограничења
- Корисничка порука – садржи конкретан задатак и улазне податке специфичне за сваки позив.

Модел коришћен у свим позивима је *GPT-4.1*, који је у тренутку развоја представљао најповољнији а довољно напредан модел у оквиру *OpenAI* понуде да извршава задате функционалности на српском језику, са напредним способностима разумевања контекста и генерисање структурисаног текста.

4.2. Генерисање квиза помоћу вештачке интелигенције

Прва и најзначајнија функционалност вештачке интелигенције унутар апликације је аутоматско генерисање комплетног квиза на основу: теме квиза, категорије, нивоа тежине и броја питања.
На основу задатих параметара, *GPT-4.1* генерише квиз у *JSON* формату који садржи наслов, опис, временско ограничење и листу питања са свим одговорима и тачним одговорима. Тако генерисани квиз приказује се администратору као преглед пре чувања.

4.3. Провера квалитета квиза

Функционалност провере квалитета квиза омогућава администратору да пре објављивања квиза затражи анализу садржаја квиза. Сервис шаље текст свих питања и одговора моделу који их анализира и враћа листу уочених проблема.
Сваки пронађени проблем се враћа са описом, озбиљношћу и бројем питања на које се односи. Овакав механизам доприноси образовној вредности квизова јер идентификује садржајне грешке које би могле да доведу кориснике у заблуду.

4.4. Систем наговештаја током решавања квиза

Систем наговештаја пружа кориснику могућност да током решавања квиза затражи *AI* помоћ за конкретно питање на ком се налази. Серверска страна шаље моделу текст питања, тип питања и листу понуђених одговора (без означавања тачног), а модел је инструисан да пружи наговештај који усмерава размишљање без директног откривања одговора.
Наговештај је доступан само једном по питању односно након што је приказан, дугме се деактивира. Ово ограничење обезбеђује да наговештај не буде тривијална пречица, већ алат који корисника подстиче на даље размишљање

4.5. Објашњење тачних одговора

Након завршетка квиза, корисник може затражити објашњење за свако питање у квизу. Ова функционалност осмишљена је као едукативни алат који кориснику помаже да разуме зашто је одређени одговор тачан.
Сервис шаље моделу листу свих питања квиза заједно са тачним одговорима и одговорима корисника. Модел генерише засебно објашњење за свако питање у низу, на српском језику.

5. ЕВАЛУАЦИЈА ПЕРФОРМАНСИ ГЕНЕРИСАЊА КВИЗОВА ПОМОЋУ ВЕШТАЧКЕ ИНТЕЛИГЕНЦИЈЕ

У овом поглављу приказано је мерење времена потребног за генерисање квизова различитих величина

уз поређење са проценом времена које би исти посао захтевао при ручном креирању.

5.1. Методологија мерења

Мерење је спроведено кроз серију позива ка *AI* генератору квизова у оквиру апликације, при којима су бирани различити бројеви питања (5, 10, 15 и 20). Време је мерено на серверској страни помоћу класе *StopWatch* из *.NET* стандардне библиотеке, од тренутка слања захтева ка *OpenAI API* до тренутка када сервер прими и парсира комплетан одговор.
За процену времена ручног креирања, узете су следеће претпоставке засноване на радном процесу:

- Формулисање једног питања са понуђеним одговорима: просечно 3 до 5 минута (укључује осмишљавање питања, дефинисање одговора и проверу тачног одговора)
- Подешавање метаподатака квиза (наслов, опис, тежина, временско ограничење) што је око 2 минута

Табела 1. Поређење времена *AI* генерисања и ручног креирања квизова

Број питања	***AI* генерисање (s)**	**Ручно креирање (s)**	**Убрзање (x)**
5	8,94	1320	147,7
10	9,33	2520	270,3
15	12,34	3720	301,4
20	20,45	4920	240,6

5.2. Анализа резултата

Приказани резултати из табеле 1 указују на драстичну разлику у времену потребном за креирање квизова између приступа потпомогнутог вештачком интелигенцијом и ручног приступа. За квиз од десет питања, генератор испоручује комплетан садржај за 9,33 секунди, док би исти квиз ручно захтевао процењених 2520 секунди (42 минута), што представља убрзање од 270,3 пута.
Потребно је нагласити да генерисање вештачком интелигенцијом не само да је брже, већ и генерише разноврснији садржај. Систем аутоматски комбинује различите типове питања и прилагођава формулацију одговарајућем нивоу тежине.

6. ЗАКЉУЧАК

У овом раду описани су развој и евалуација *web* апликације *Kvizio*, прецизније, система за креирање и решавање квизова који користи велики језички модел *GPT-4.1* као централни елемент четири функционална модула: аутоматско генерисање питања, наговештаји током решавања, објашњења тачних одговора и провера квалитета квиза.
Мерења спроведена у току употребе показала су да генерисање квиза од десет питања траје око десет секунди, насупрот процењених 42 минута при ручном раду. Ова разлика није само ствар брзине, већ сервис истовремено комбинује различите типове питања и прилагођава формулацију задатом нивоу тежине, што би ручно захтевало додатно време и искуство аутора.
Систем је контејнеризован помоћу *Docker* технологије и може се покренути на било којој машини без претходне конфигурације окружења, што га чини прикладним за даљи развој и тестирање.
Даље унапређење могло би обухватити адаптивни систем тежине који прати напредак индивидуалног корисника као и проширење на више језичких модела ради поређења квалитета генерисаног садржаја.

7. ЛИТЕРАТУРА

[1] S.J. Russell, P. Norvig, "*Artificial Intelligence: A Modern Approach*", Hoboken, Pearson, 2021.

[2] J. McCarthy, M.L. Minsky, N. Rochester, C.E. Shannon, *"*A Proposal for the Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence*"*, Hanover, 1955.

[3] A.M. Turing, *"*Computing Machinery and Intelligence*"*, Mind, Vol. 59, No. 236, pp. 433-460, 1950.

[4] A. Krizhevsky, I. Sutskever, G.E. Hinton, *"*ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks*"*, *Advances in Neural Information Processing Systems*, Vol. 25, pp. 1097-1105, 2012.

[5] A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar, J. Uszkoreit, L. Jones, A.N. Gomez, Ł. Kaiser, I. Polosukhin, *"*Attention Is All You Need*"*, *Advances in Neural Information Processing Systems*, Vol. 30, pp. 5998-6008, 2017.

[6] OpenAI, *"*GPT-4 Technical Report*", arXiv preprint arXiv:2303.08774*, 2023.

[7] http://developers.openai.com/api/docs/guides/prompt-engineering (pristupljeno u junu 2026.)

[8] W. Holmes, M. Bialik, C. Fadel, *"Artificial Intelligence in Education: Promises and Implications for Teaching and Learning"*, Boston, Center for Curriculum Redesign, 2019.

[9] UNESCO, *"Guidance for Generative AI in Education and Research"*, Paris, UNESCO, 2023.

[10] M.A. Chaudhry, E. Kazim, *"*Artificial Intelligence in Education (AIEd): A High-Level Academic and Industry Note 2021*"*, *AI and Ethics*, Vol. 2, pp. 157-165, 2022.

Кратка биографија:



Милош Јосиповић рођен је у Ужицу 2000. године. Дипломирао је на Факултету техничких наука 2023. године, на смеру Примењено софтверско инжењерство.
Контакт:
milos.josipovic2000@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 621.365.5:621.64
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36BE43Markovic

Индуктивни грејачи у транспорту флуида

Inductive Heaters in Fluid Transfer

Новица Марковић, Дејан Јеркан, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОНИКА И ТЕЛЕКОМУНИКАЦИЈЕ

Кратак садржај – *У раду је анализирана примена индуктивних грејача у транспорту флуида. Разматрани су проблеми таложења парафина и повећања вискозности нафте при снижавању температуре, као и значај одржавања температуре флуида изнад тачке стињавања. Представљен је принцип рада индуктивног грејања заснован на електромагнетној индукцији, уз анализу skin ефекта и дубине продирања електромагнетног поља у челичне цевоводе. У оквиру рада извршен је прорачун параметара индуктивног грејача за конкретан цевоводни систем, са циљем одређивања потребних електричних и електромагнетних величина за ефикасно загревање цевовода. Анализа показује да индуктивно грејање представља енергетски ефикасно и поуздано решење за примену у системима транспорта флуида.*

Кључне речи (три до пет): *индуктивни грејач, транспорт нафте, парафин, скин ефекат, електромагнетна индукција*

Abstract – *This study analyzes the application of inductive heaters in fluid transport. It considers the problems of paraffin deposition and the increase in oil viscosity at lower temperatures, as well as the importance of maintaining fluid temperature above the pour point. The principle of inductive heating based on electromagnetic induction is presented, together with an analysis of the skin effect and the penetration depth of the electromagnetic field in steel pipelines. A calculation of inductive heater parameters for a specific pipeline system was carried out, with the aim of determining the necessary electrical and electromagnetic quantities for efficient pipeline heating. The analysis indicates that inductive heating is an energy-efficient and reliable solution for use in fluid transport systems.*

Keywords: (three to five): *inductive heater, oil transport, paraffin, skin effect, electromagnetic induction*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Дејан Јеркан, ванр. проф.

1. УВОД

Транспорт сирове нафте цевоводима представља основни и најекономичнији начин преноса великих количина флуида у нафтној индустрији. Савремени цевоводни системи омогућавају континуалан и поуздан транспорт нафте на великим растојањима, уз висок степен аутоматизације и релативно ниске оперативне трошкове. Међутим, током експлоатације и транспорта сирове нафте јављају се бројни технички изазови који директно утичу на поузданост и ефикасност рада система. Један од најзначајнијих проблема представља таложење парафина унутар цевовода, које настаје услед снижавања температуре нафте испод тачке стињавања. Таложење парафина доводи до повећања вискозности флуида, смањења протока и повећаних падова притиска, док у екстремним случајевима може доћи и до потпуног зачепљења цевовода и прекида транспорта. Овакви проблеми су посебно изражени код високопарафинских сирових нафти и у условима ниских температура околине. Из тог разлога, у пракси се примењују различите методе за одржавање температуре нафте изнад критичне вредности, како би се обезбедио стабилан транспорт и спречило формирање парафинских наслага.

Једно од савремених решења за загревање цевовода представља примена индуктивних грејача. Индуктивно грејање заснива се на електромагнетној индукцији, при чему се топлота генерише директно у металу цевовода услед појаве вртложних струја. Овакав начин грејања омогућава високу енергетску ефикасност, смањене топлотне губитке и одсуство директног контакта грејног елемента са флуидом, што га чини погодним за примену у нафтној индустрији. Посебан значај има примена нискофреквентног индуктивног грејања код масивних челичних цевовода, где је потребно остварити већу дубину продирања електромагнетног поља и равномерније загревање.

У овом раду разматрана је примена индуктивних грејача у транспорту флуида. Анализиран је принцип рада индуктивног грејања, утицај *skin* ефекта и дубине продирања електромагнетног поља, као и прорачун основних параметара индуктивног грејача за конкретан цевоводни систем. Циљ рада је да се прикаже применљивост индуктивног грејања као енергетски ефикасног и поузданог решења за

спречавање таложења парафина и обезбеђивање стабилног транспорта флуида.

2. ТЕРМИЧКИ ПРОБЛЕМИ У ТРАНСПОРТУ НАФТЕ

Транспорт сирове нафте кроз цевоводне системе праћен је бројним техничким изазовима који директно утичу на поузданост, ефикасност и економичност рада транспортног система. Један од најзначајнијих проблема представља промена реолошких особина нафте услед снижавања температуре током транспорта. Ова појава је посебно изражена код парафинских сирових нафти, које садрже значајан проценат парафинских угљоводоника.

При паду температуре испод одређене критичне вредности долази до кристализације и таложења парафина на унутрашњим зидовима цевовода као што је приказано на слици 1. Формирање парафинских наслага доводи до смањења ефективног попречног пресека цевовода, повећања хидрауличких отпора и пада протока. Истовремено, долази до повећања вискозности нафте, што додатно отежава транспорт и повећава потребну снагу пумпних система. У екстремним случајевима може доћи до потпуног зачепљења цевовода и прекида транспорта.

Интензитет таложења парафина директно зависи од температуре флуида, садржаја парафина у нафти, брзине струјања, као и температуре околине. Посебан значај има температура стињавања нафте, која представља најнижу температуру при којој нафта задржава способност течења. Код високопарафинских нафти температура стињавања може бити релативно висока, што представља значајан проблем у условима ниских спољашњих температура и транспорта на већим растојањима. У табели 1. дата је корелација између садржаја парафина и тачке стињавања односно течења нафте.



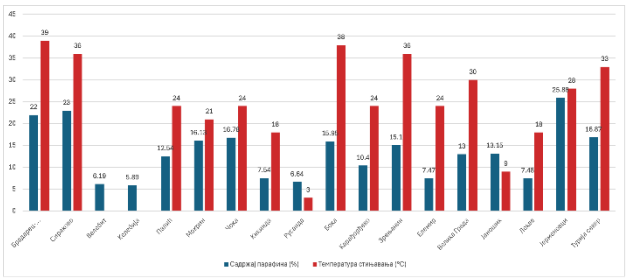
Слика 1. Приказ последице парафина у нафти [4][1]

Табела 1. Корелација између садржаја парафина и тачке течења нафте [2]

Садржај парафина (%)	Тачка стињавања (°C)
12,7	23
15,4	27
18	29
23	33
29,3	36

Проблем таложења парафина присутан је и у домаћој производњи нафте. Сирова нафта која се експлоатише у Србији претежно припада парафинском типу, при чему значајан број лежишта карактерише висок садржај парафина и повишена температура стињавања. На слици 2. дат је приказ садржаја парафина (%) и температуре стињавања (°C) сирове нафте за различита нафтна поља у Србији. Због тога је неопходна примена различитих метода за одржавање температуре нафте током транспорта, како би се спречило формирање наслага и обезбедио континуалан рад цевоводног система.

У циљу решавања наведених проблема примењују се хемијске и термичке методе. Хемијске методе заснивају се на употреби адитива који смањују тенденцију кристализације парафина, док термичке методе подразумевају одржавање температуре нафте изнад тачке стињавања. У оквиру термичких метода значајно место заузимају системи активног загревања цевовода, међу којима се индуктивно грејање издваја као енергетски ефикасно и технички поуздано решење.



Слика 2. Приказ садржаја парафина (%) и температуре стињавања (°C) сирове нафте за различита нафтна поља у Србији [3]

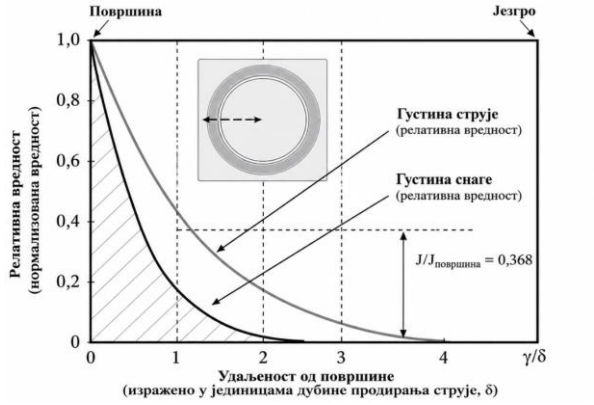
3. ИНДУКТИВНИ ГРЕЈАЧ

Индуктивно грејање представља метод загревања заснован на електромагнетној индукцији, при чему промењљиво магнетно поље индуктора изазива појаву вртложних струја у електрично проводном материјалу. Услед електричне отпорности материјала, енергија индукованих струја дисипира се у облику топлоте, чиме долази до директног загревања радног комада. Код феромагнетних материјала, као што су челични цевоводи, процесу загревања додатно доприносе и хистерезни губици. За разлику од конвенционалних метода загревања, код индуктивног грејања топлота се генерише директно у материјалу цеви, без потребе за посредним преносом топлоте. На тај начин смањују се топлотни губици и повећава енергетска ефикасност система. Овакве карактеристике чине индуктивно грејање погодним за примену у цевоводним системима за транспорт нафте, где је неопходно одржавање температуре флуида изнад тачке стињавања. Један од феномена код индуктивног грејања представља *skin* ефекат. При протоку наизменичне струје густина струје није равномерно распоређена по попречном пресеку проводника, већ је концентрисана у површинским слојевима материјала, док према унутрашњости експоненцијално опада. Последица ове појаве је да се највећи део топлоте генерише у близини површине материјала. Расподела густине струје описује се изразом (1) и приказана је на слици 3:

$$J = J_0 \cdot e^{-\frac{r}{\delta}} \qquad (1)$$

где су:

- J_0 – густина струје на површини
- r – удаљеност од површине
- δ – дубина продирања



Слика 3. Расподела густине струје и густине снаге услед skin ефекта [1][4]

За квантитативни опис skin ефекта уводи се дубина продирања електромагнетног поља δ, која представља растојање од површине проводника до тачке у којој густина струје опада на $\frac{1}{e}$ своје максималне вредности. Дубина продирања зависи од електричне отпорности, магнетне пермеабилности материјала и фреквенције напајања, а одређује се изразом (2):

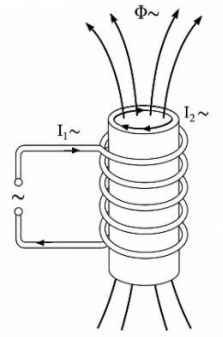
$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{2\pi f \mu}} \qquad (2)$$

Из наведеног израза види се да дубина продирања опада са порастом фреквенције, док ниске фреквенције омогућавају веће продирање електромагнетног поља у материјал. Због тога је мрежна фреквенција од 50 Hz погодна за загревање масивних челичних цевовода, јер омогућава равномерније и запреминско загревање. У оквиру овог рада разматра се индуктивни грејач намењен загревању челичног цевовода за транспорт сирове нафте. Индуктор је реализован спиралним намотавањем проводника око цеви, као што је приказано на слици 4, чиме се формира промењљиво магнетно поље које индукује вртложне струје у зиду цевовода (слика 5).



Слика 4. Приказ намотавања индуктивног грејача

Значај индуктивног грејања у транспорту нафте огледа се у могућности ефикасног и равномерног загревања цевовода, без директног контакта грејног елемента са флуидом. На тај начин смањују се топлотни губици и повећава поузданост система, што индуктивно грејање чини погодним решењем за спречавање таложења парафина у цевоводима.



Слика 5. Принцип рада индуктивног грејача

4. ПРОРАЧУН ИНДУКТИВНОГ ГРЕЈАЧА

У овом поглављу разматра се прорачун индуктивног грејача. Прорачун се односи на загревање челичног цевовода израђеног од челика API 5L Grade B, при мрежној фреквенцији напајања од 50 Hz. Као проводник индуктора усвојен је бакарни проводник са силиконском изолацијом, намотан спирално око цевовода, који се налази у надземном делу транспортног система. На основу усвојене снаге и параметара система, прорачуном се одређују основни електрични и геометријски параметри индуктивног грејача, пре свега потребан број намотаја индуктора и струја која протиче кроз намотај.

$$\omega = 2\pi f \tag{3}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}, \tag{4}$$

Дубина продирања за бакар:

$$\mu = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \ \ \frac{H}{m}$$

$$\sigma_{cu0} = 56 \cdot 10^{6} \frac{S}{m} \quad \text{при } 20℃$$

Температурни коефицијент је $\alpha = 4 * 10^{-3} \ \ \frac{1}{℃}$

Специфична проводност за различите температуре следи из:

$$\sigma_{cu} = \frac{1}{\rho} \tag{5}$$

$$\rho_t = \rho_{20}(1 + \alpha \cdot \Delta t) \tag{6}$$

Из (5) и (6) на температури 45 ℃ проводност бакра је $50{,}9 \cdot 10^{6} \left[\frac{S}{m}\right]$.

Рачунајући на исти начин за секундар (цев):

$$\sigma_{steel0} = 7{,}7 \cdot 10^{6} \ \left[\frac{S}{m}\right] \text{ при } 20℃$$

$$\sigma_{steel} = 7 \cdot 10^{6} \ \left[\frac{S}{m}\right] \text{при } 45℃.$$

За одређивање геометрије намотаја индуктивног грејача уводи се фактор пуњења намотаја, који представља однос између попуњености простора проводником и укупне дужине грејача:

$$g = \frac{d \cdot \pi \cdot W}{4 \cdot L} \tag{7}$$

где су:

g – фактор пуњења

d – пречник проводника

W – број намотаја

L – дужина грејача

Због *skin* ефекта и потискивања струје у намотају, реалне вредности активног и реактивног отпора примара разликују се од вредности добијених једноставним прорачуном. Ови ефекти доводе до повећања ефективног отпора проводника, па је у прорачуну неопходно увести корекционе факторе за активни и реактивни отпор примара:

$$Kr = \sqrt{2} \cdot \frac{A \cdot C + B \cdot D}{C^2 + D^2} \tag{7}$$

$$Kx = \sqrt{2} \cdot \frac{B \cdot C - A \cdot D}{C^2 + D^2} \tag{8}$$

где су:

$$A = \text{ber}X_k \cdot \text{ker}'X_b - \text{bei}X_k \cdot \text{kei}'X_b - \text{ber}'X_b \cdot \text{ker}X_k + \text{bei}'X_b \cdot \text{kei}X_k \tag{9}$$

$$B = \text{bei}X_k \cdot \text{ker'Xb} + \text{ber}X_k \cdot \text{kei}X_b - \text{ber}X_b \cdot \text{kei}X_k - \text{bei}X_b \cdot \text{ker}X_k \tag{10}$$

$$C = \text{ber}X_k \cdot \text{kerXb} - \text{bei}X_k \cdot \text{kei}X_b - \text{ber}X_b \cdot \text{ker}X_k + \text{bei}X_b \cdot \text{kei}X_k \tag{11}$$

$$D = \text{bei}X_k \cdot \text{kerXb} + \text{ber}X_k \cdot \text{kei}X_b - \text{ber}X_b \cdot \text{kei}X_k - \text{bei}X_b \cdot \text{ker}X_k \tag{12}$$

Функције ber, bei, ker, kei односно њихове деривације ber', bei', ker', kei' су Келвинове функције, док су аргументи X_k и X_b односи полупречника кривине намотаја према дубини продирања електромагнетног таласа:

$$X_k = \sqrt{2} \cdot \frac{r_1}{\delta_{cu}} \tag{13}$$

$$X_b = \sqrt{2} \cdot \frac{r_2}{\delta_{cu}} \tag{14}$$

Расипни ток између примара и секундара сразмеран је површини кружног прстена између два калема, магнетној пермеабилности ваздуха и фреквенцији, па се импеданса може изразити као:

$$Z_R = \frac{W^2}{L} \cdot \omega\mu_0 \cdot \pi \cdot \frac{{d_1}'^2 - {d_2}'^2}{4} \tag{15}$$

где су:

$${d_1}' = d_1 + \delta_{cu} \tag{16}$$

$${d_2}' = d_2 + \delta_{steel} \tag{17}$$

Односно сведено на један завој једначине дужине

$$Z_{R1} = \frac{Z_R \cdot L}{W} \tag{18}$$

Потребан број намотаја грејача може се извести преко Поингтовог вектора струјања густине енергије па број намотаја износи:

$$W = \frac{\mu \cdot U^2}{\frac{W}{L} \cdot P_2} \cdot \frac{A}{A^2 + B^2} \tag{19}$$

P – снага индуктивног грејача
Члан A је израз:

$$A = \frac{d_1 \cdot \pi}{\sigma_{cu} \cdot \delta_1 \cdot g} \cdot k_r + \frac{d_2 \cdot \pi}{\sigma_{steel} \cdot \delta_2} \quad (20)$$

Члан B је израз:

$$B = \frac{d_1 \cdot \pi}{\sigma_{cu} \cdot \delta_1 \cdot g} k_x + \frac{d_2 \cdot \pi}{\sigma_{steel} \cdot \delta_2} + \omega \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot \frac{d_1'^2 - d_2'^2}{4} \quad (21)$$

Где је последњи члан од „B" расипни индуктивни Z_{R1}.Степен корисности грејача је однос развијене топлоте у секундару према укупној утрошеној енергији. Како су сразмерне отпорима на примару и секундару следи:

$$\eta = \frac{R'_2}{R_1 + R'_2} \quad (22)$$

Отпори се односе као:

$$\frac{R'_2}{R_1} = \frac{W^2 \cdot R_2}{R_1} = \frac{\frac{W^2 \cdot d_2 \cdot \pi}{\sigma_{steel} \cdot \delta_{\text{steel}} \cdot L}}{\frac{W^2 \cdot d_1 \cdot \pi \cdot K_r}{\sigma_{cu} \cdot \delta_{\text{cu}} \cdot g \cdot L}} = \frac{\sigma_{cu} \cdot \delta_{\text{cu}} \cdot g \cdot d_2}{\sigma_{steel} \cdot \delta_{\text{steel}} \cdot Kr} \quad (23)$$

Из израза (20), (21) и (23) добијају се чланови који су потребни за прорачун броја намотаја грејача (19).

За прорачун струје коју грејачи узимају из мреже треба израчунати импедансу сваког грејача која се састоји од отпора примара и секундара, те од индуктивности примара, секундара и расипног тока и изводи се из Максвелових једначина за електромагнетне таласе да импеданса грејача сведене на стезаљке примара износи:

$$Z = \frac{W^2}{L} \cdot \left[\frac{d_1 \cdot \pi}{\sigma_{cu} \cdot \delta_1 \cdot g} \cdot k_r + \frac{d_2 \cdot \pi}{\sigma_{steel} \cdot \delta_2} + j \left(\frac{d_1 \cdot \pi}{\sigma_{cu} \cdot \delta_1 \cdot g} \cdot k_X + \frac{d_2 \cdot \pi}{\sigma_{steel} \cdot \delta_2} + \omega \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot \frac{d_1'^2 - d_2'^2}{4} \right) \right] \quad (24)$$

Израз се своди на:

$$Z = \frac{W^2}{L} \cdot [A + jB] \quad (25)$$

Струја грејача се добија из:

$$I = \frac{U}{Z} \quad (26)$$

Приказани изрази представљају основу за одређивање основних електричних и геометријских параметара индуктивног грејача.

5. ЗАКЉУЧАК

У раду је анализирана примена индуктивних грејача у транспорту флуида кроз челичне цевоводе. Размотрени су проблеми таложења парафина и повећања вискозности нафте услед снижавања температуре, као и значај одржавања температуре флуида изнад тачке стињавања ради обезбеђивања поузданог транспорта.

Приказан је принцип рада индуктивног грејања заснован на електромагнетној индукцији, уз анализу *skin* ефекта и дубине продирања електромагнетног поља у материјал цевовода. У оквиру рада приказан је поступак прорачуна основних параметара индуктивног грејача, при чему су разматрани електрични и електромагнетни параметри неопходни за одређивање броја намотаја и струје индуктора.

На основу приказаних теоријских основа може се закључити да индуктивно грејање представља енергетски ефикасно и перспективно решење за загревање цевовода и спречавање таложења парафина у системима транспорта нафте.

6. ЛИТЕРАТУРА

[1] World Iron & Steel Co.,LTD.

[2] Лабораторијско испитивање и симулација процеса таложења парафина у нафтној бушотини поља Турија у Војводини, Душан Ш. Даниловић, Весна Д. Каровић Маричић, Радмила М. Шећеров Соколовић, Дејан Д. Ивезић, Марија А. Живковић.

[3] Анализа параметара цевоводног транспорта сирове нафте, Јасна Толмач, Славица Првуловић, Марија Недић и Драгиша Толмач.

[4] Oil and gas production handbook, Håvard Devold.

[5] V. Rudnev, D. Loveless, R. Cook, *Handbook of Induction Heating*, CRC Press, Boca Raton, 2017.

Кратка биографија:

Новица Марковић рођен је у Ваљеву 2000. год. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Електротехнике и рачунарства – Дистрибуирани енергетски ресурси и паметне мреже одбранио је 2026. год.

Контакт:
novicamarkovi00@gmail.com

Дејан Јеркан је ванредни професор на Факултету техничких наука у Новом Саду, на Катедри за Енергетску електронику и претвараче. Област интересовања су му моделовање и дијагностика електричних машина, као и метода коначних елемената.

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 621.316.1
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36BE44Mihajlovic

Одређивање оптималних локација и снага кондензаторских батерија у радијалним дистрибутивним мрежама применом симулираног каљења

Determination of Optimal Locations and Sizes of Capacitor Banks in Radial Distribution Networks Using Simulated Annealing

Марија Михајловић, Невен Ковачки, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И РАЧУНАРСТВО

Кратак садржај – *У овом раду је приказан алгоритам за одређивање оптималних локација и снага кондензаторских батерија у средњенапонским дистрибутивним мрежама. Као критеријумска функција разматрана је минимизација укупних трошкова, који обухватају инвестиционе трошкове кондензаторских батерија и трошкове губитака електричне енергије. У раду је представљен алгоритам заснован на симулираном каљењу за решавање овог проблема. Представљени алгоритам је верификован на примеру дистрибутивне мреже која се састоји од 100 чворова.*

Кључне речи: *дистрибутивна мрежа, оптимизација, кондензаторска батерија, симулирано каљење*

Abstract – *This paper presents an algorithm for determining the optimal locations and sizes of capacitor banks in medium-voltage distribution networks. The objective function is defined as the minimization of total costs, including investment costs of capacitor banks and electrical energy loss costs. A simulated annealing-based algorithm is proposed for solving this problem. The algorithm is verified on a distribution network consisting of 100 buses.*

Keywords: *distribution network, optimization, capacitor bank, simulated annealing*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Невен Ковачки, доцент

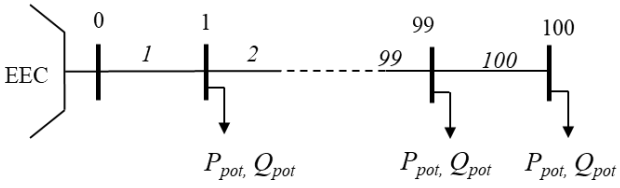
1. УВОД

Компензација реактивне снаге представља једну од основних мера за унапређење енергетске ефикасности и квалитета електричне енергије у дистрибутивним системима. Токови реактивних снага у дистрибутивним водовима доводе до повећања губитака снаге и падова напона у чворовима мреже. Применом кондензаторских батерија могуће је локално, тј. на месту потрошње, обезбедити реактивну снагу, чиме се смањује оптерећење дистрибутивних водова, смањују губици и побољшавају напонске прилике у мрежи.

У овом раду најпре је, ради сагледавања ефеката компензације реактивне снаге, анализиран утицај уградње једне кондензаторске батерије на смањење губитака у дистрибутивној мрежи. Затим је формулисан оптимизациони проблем за одређивање оптималних локација и снага произвољног броја кондензаторских батерија. Као критеријумска функција дефинисана је минимизација трошкова кондензаторских батерија и трошкова губитака електричне енергије. За решавање овог проблема примењен је алгоритам заснован на симулираном каљењу, који омогућава ефикасно претраживање простора могућих решења. При томе су, у циљу поједностављења прорачуна, анализиране само фиксне кондензаторске батерије, без могућности регулације напона, фактора снаге и сл. Предложени алгоритам је верификован на примеру радијалне дистрибутивне мреже која се састоји од 100 чворова.

2. АНАЛИЗА УГРАДЊЕ ЈЕДНЕ КОНДЕНЗАТОРСКЕ БАТЕРИЈЕ

У овом поглављу се анализира утицај уградње једне кондензаторске батерије на напонске прилике и губитке снаге у дистрибутивној мрежи. Разматра се надземна радијална дистрибутивна мрежа назívног напона 20 kV, приказана на слици 1. Разматрана мрежа се састоји од 100 чворова, при чему је оптерећење у свим чворовима једнако и износи $P_{pot} = 80\ \text{kW}$ и $Q_{pot} = 60\ \text{kVAr}$. Дужине свих грана су једнаке и износе 0,1 km, док су подужни параметри грана редом $r = 0{,}3\ \Omega/\text{km}$ и $x = 0{,}35\ \Omega/\text{km}$. Сматра се да је напон на почетку мреже константан и износи 20,5 kV. Оваква поједностављена мрежа омогућава јасно сагледавање утицаја локације кондензаторске батерије на губитке и напонске прилике.

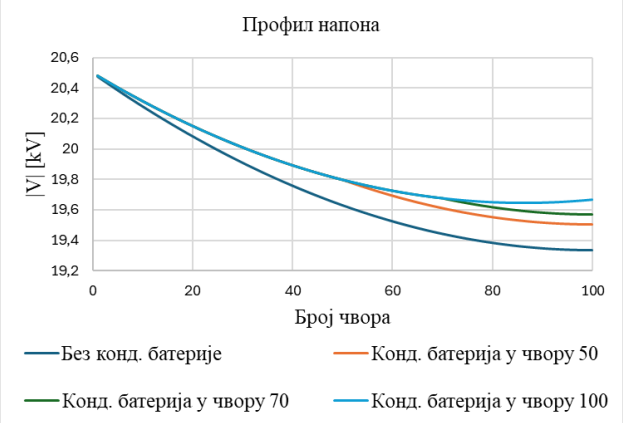


Слика 1. Разматрана дистрибутивна мрежа

Анализирају се три локације кондензаторске батерије снаге $Q_c = 2\ MVAr$ у разматраној мрежи:

- на средини мреже, тј. у чвору 50,
- на 2/3 мреже гледано са почетка, тј. у чвору 70 и
- на крају мреже, тј. у чвору 100.

За наведене локације кондензаторске батерије су прорачунати токови снага у дистрибутивној мрежи. На слици 2 приказан је напонски профил мреже за разматране случајеве, као и за случај када у мрежи није уграђена кондензаторска батерија. С друге стране, у табели 1 су приказане вредности напона на крају мреже, као и губици снаге за разматране случајеве.



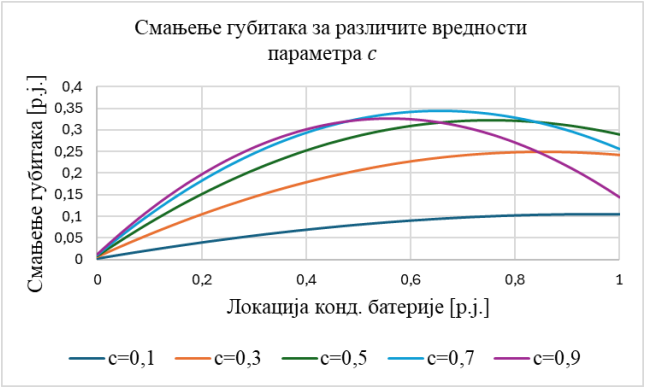
Слика 2. Напонски профил за разматране случајеве

Резултати приказани на слици 2 показују да уградња кондензаторске батерије значајно смањује падове напона и губитке у разматраној дистрибутивној мрежи. Најбољи резултати су добијени за случај када је кондензаторска батерија уграђена на крају дистрибутивне мреже. У том случају је пад напона у односу на почетак дистрибутивне мреже смањен са 5,6 % (када нема кондензаторске батерије) на 4 %, док су губици снаге смањени са 0,26 MW на 0,20 MW, тј. за 23 %. Добијени резултати показују да локација кондензаторске батерије утиче на ефикасност режима дистрибутивне мреже.

Како би се истовремено испитали утицаји локације и снаге кондензаторске батерије, извршена је анализа смањења губитака у дистрибутивној мрежи приказана на слици 3. На овој слици је приказана зависност смањења губитака од локације кондензаторске батерије и параметра *c*.

Табела 1. Резултати за разматране случајеве

Разматрани случај	Напон на крају мреже	Губици
Без кондензаторске батерије	19,34 kV	0,2651 MW
Кондензаторска батерија у чвору 50	19,51 kV	0,2099 MW
Кондензаторска батерија у чвору 70	19,57 kV	0,2009 MW
Кондензаторска батерија у чвору 100	19,67 kV	0,2007 MW



Слика 3. Утицај уградње кондензаторске батерије на смањење губитака

Параметар c представља степен компензације реактивне снаге, тј. однос реактивне снаге кондензаторске батерије и укупне реактивне снаге оптерећења за целу дистрибутивну мрежу, односно:

$$c = \frac{Q_c}{Q_{pot}}. \qquad (1)$$

На основу резултата са слике 3 може се закључити да на смањење губитака у дистрибутивној мрежи истовремено утичу и локација и снага кондензаторске батерије која се уграђује. Најповољнији ефекат у овом случају, тј. највеће смањење губитака, постиже се када је кондензаторска батерија постављена на 2/3 дужине мреже гледано од почетка и при степену компензације 0,7.

Међутим, оптималан избор локације и снаге кондензаторских батерија се не може одредити једноставном анализом појединачних случајева, већ захтева систематичан приступ који истовремено узима у обзир техничке и економске аспекте рада мреже.

3. ФОРМУЛАЦИЈА ОПТИМИЗАЦИОНОГ ПРОБЛЕМА

У овом поглављу је формулисан оптимизациони проблем за одређивање оптималних локација и снага кондензаторских батерија које је потребно уградити у разматраној дистрибутивној мрежи како би се минимизирали укупни трошкови кондензаторских батерија и губитака електричне енергије. Разматрају се три типа кондензаторских батерија чије су снаге редом 600 kVAr, 900 kVAr и 1200 kVAr, а инвестициони трошкови редом 10000 €, 18000 € и 25000 €.

Критеријумска функција представља укупни трошак система, који обухвата инвестиционе трошкове уградње кондензаторских батерија и трошкове губитака електричне енергије и дата је формулом:

$$F = C_{cap} + C_{loss}. \qquad (2)$$

Укупни трошкови губитака одређују се за цео експлоатациони период кондензаторских батерија, при чему се за сваку годину узима у обзир очекивани раст оптерећења. Добијени трошкови губитака затим се своде на садашњу вредност применом усвојене стопе свођења. Трошкови губитака рачунају се на основу израза:

$$C_{loss} = \sum_{t=1}^{T} \frac{E_{loss,t} \cdot c_e}{(1+i)^t}, \quad (3)$$

где је $E_{loss,t}$ годишња енергија губитака у години t, c_e цена електричне енергије, а i стопа свођења.

При решавању оптимизационог проблема неопходно је задовољити одређена техничка и експлоатациона ограничења, која обухватају ограничење расположивог буџета за инвестирање, дозвољене границе напона у чворовима мреже, као и термичка ограничења грана дистрибутивне мреже.

4. АЛГОРИТАМ СИМУЛИРАНОГ КАЉЕЊА

Решавање постављеног оптимизационог проблема спроводи се применом алгоритма симулираног каљења, који је приказан у наставку. Алгоритам се заснива на стохастичком претраживању простора решења, при чему се у раним итерацијама омогућава прихватање и неповољнијих решења, ради избегавања локалних минимума.

Поред основног механизма претраживања, значајну улогу у ефикасности алгоритма има избор параметара хлађења, као што су почетна температура, коефицијент хлађења и број итерација по температури. Правилан избор ових параметара омогућава постизање равнотеже између брзине конвергенције и квалитета добијеног решења.

Такође, начин генерисања суседних решења има значајан утицај на ток оптимизације. У овом раду суседна решења добијају се изменом локације или снаге једне кондензаторске батерије.

Стопа прихватања представља однос броја прихваћених и укупно генерисаних суседних решења за дату температуру и указује на степен истраживања простора решења алгоритма.

Модификовани метод симулираног каљења за потребе решавања проблема оптималне расподеле кондензаторских батерија у дистрибутивној мрежи може се представити следећим псеудокодом:

Улаз: Програм (распоред) хлађења: /*Почетна температура(T_{max}), Крајња температура(T_{min}), Темпо (брзина) хлађења, Број итерација на одређеној температури*/.

s = s0; /*Генерисање почетног допустивог решења, тј. почетног решења, нпр. без кондензаторских батерија у мрежи*/

$T_k = T_{max}$; /*Почетна температура*/

k=1;

Понављати /*Глобална итерација, k*/

Понављати /*На одређеној температури T_k , односно у глобалној итерацији k*/

На основу текућег решења s на случајан начин генерисати суседно (блиско) решење s', тј. нови скуп кондензаторских батерија, додавањем једне или променом локације или снаге постојеће кондензаторске батерије;

$\Delta E = f(s') - f(s)$; /*Разлика критеријумских функција, тј. трошкова у ова два решења*/

Ако је $E \leq 0$ ***Онда*** s = s' / *Прихватити s' као текуће решење*/

У супротном Прихватити s' са вероватноћом $e^{-\Delta E/T_k}$, односно прихватити s' ако важи: $e^{-\Delta E/T_k} > rand[0,1]$;

Ако је f(s') − f(sbest) < 0 ***Онда*** sbest = s'; / *Прихватити s' као најбоље решење до сада (sbest)* /

Док Услов заустављања /*Док није испитан задати број суседних решења на температури T_k */

$T_{k+1} = \alpha \cdot T_k$; /* Темпо (брзина) хлађења, α є [0,5 – 0,99]*/

k=k+1;

Док Критеријум заустављања /*$T_k < T_{min}$*/

***Излаз*:** Најбоље пронађено решење (sbest)

Приказани алгоритам је тестиран за три случаја, за буџет од 25000 €, 50000 € и 100000 €. Резултати оптимизације су приказани у табели 2, док је ток предложеног алгоритма представљен дијаграмима на сликама 4 и 5.

Са дијаграма на слици 4 уочава се да алгоритам у почетним итерацијама доводи до значајног смањења вредности критеријумске функције, након чега долази до постепене стабилизације, што указује на приближавање оптималном решењу.

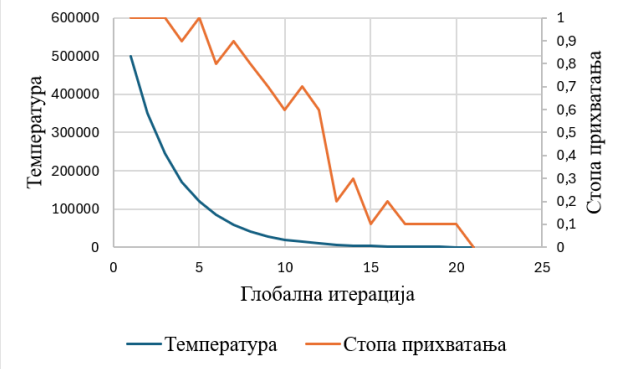
Табела 2. Резултати оптимизације

Резултати	Буџет од 0 €	Буџет од 25000 €	Буџет од 50000 €	Буџет од 100000 €
Чворови у којима је уграђена кондензаторска батерија снаге 600 kVAr	-	-	-	35, 47, 62, 67, 73, 81, 97
Чворови у којима је уграђена кондензаторска батерија снаге 900 kVAr	-	-	-	-
Чворови у којима је уграђена кондензаторска батерија снаге 1200 kVAr	-	92	73, 91	-
Инвестициони трошкови	0	25000 €	50000 €	70000 €
Трошкови губитака	883075 €	743688 €	670056 €	623841 €
Укупни трошкови	883075 €	768688 €	720056 €	693841 €



Слика 4. Конвергенција критеријумске функције за буџет од 50000 €

Промена температуре и стопе прихватања, приказана на слици 5, указује на постепено смањење вероватноће прихватања неповољнијих решења, чиме се алгоритам усмерава ка стабилизацији добијеног решења.



Слика 5. Температура и стопа прихватања за буџет од 50000 €

Резултати оптимизације приказани у табели 2 показују да повећање расположивог буџета доводи до смањења укупних трошкова система, пре свега услед смањења губитака електричне енергије. Такође, добијена решења указују на тенденцију постављања кондензаторских батерија на ограниченом броју локација већих снага, чиме се постиже повољан однос између инвестиционих трошкова и уштеда у губицима.

На овај начин се указује на значај примене оптимизационих метода у планирању компензације реактивне снаге.

5. ЗАКЉУЧАК

Анализа утицаја кондензаторских батерија показује да њихова примена значајно доприноси побољшању напонских прилика и смањењу губитака снаге у радијалној дистрибутивној мрежи. Поред локације, значајан фактор представља и степен компензације, чијим повећањем долази до додатног смањења губитака снаге. Међутим, уочено је да повећање снаге кондензаторских батерија не доводи увек до пропорционалног побољшања, што указује на потребу за оптималним избором параметара. У циљу одређивања најповољније конфигурације, формулисан је оптимизациони проблем заснован на минимизацији укупних трошкова система, који обухватају инвестиционе трошкове и трошкове губитака електричне енергије. Применом алгоритма симулираног каљења добијена су решења која обезбеђују повољан баланс између улагања и уштеда. Добијени резултати потврђују да оптимално планирање компензације реактивне снаге представља ефикасан приступ за унапређење рада дистрибутивних мрежа, како са техничког, тако и са економског аспекта.

6. ЛИТЕРАТУРА

[1] T. Gonen, Electric Power Distribution System Engineering, McGraw-Hill, 2007.

[2] Н. Рајаковић, Д. Тасић, Дистрибутивне и индустријске мреже, Академска мисао, Београд, 2008.

[3] М. Ј. Миловановић, Ј. Н. Радосављевић, Б. Д. Перовић, „Одређивање оптималних локација и снага кондензаторских батерија у дистрибутивним мрежама применом генетског алгоритма“, Техника, 2017.

[4] Н. Рајаковић, Д. Тасић, Н. Арсенијевић, М. Стојановић, Збирка задатака из дистрибутивних и индустријских мрежа, Београд, 2005.

[5] Д. Кањо, Реконфигурација дистрибутивних мрежа применом математичких и хеуристичких оптимизационих метода, мастер рад, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2021.

Кратка биографија:



Марија Михајловић рођена је у Зрењанину 1997. год. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Електротехнике и рачунарства – Електроенергетика – Дистрибуирани енергетски ресурси одбранила је 2026.год.
Контакт: marijas.mih@gmail.com



Невен Ковачки рођен је 1987. године у Зрењанину. Дипломирао је на Факултету техничких наука из области Електротехнике и рачунарства – Електроенергетски системи 2010., 2011. и 2018. године.
Контакт: kovackin@uns.ac.rs

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 621.39
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36BE45Ajder

Утицај асистената вештачке интелигенције на продуктивност, когнитивно оптерећење и концентрацију програмера

The Impact of AI Assistants on Productivity, Cognitive Load, and Deep Concentration in Developer Work

Милан Ајдер, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – СОФТВЕРСКО ИНЖЕЊЕРСТВО И ИНФОРМАЦИОНЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ

Кратак садржај – *Рад испитује утицај асистената заснованих на вештачкој интелигенцији на продуктивност, когнитивно оптерећење и дубоку концентрацију у раду програмера. Истраживање је спроведено анкетом над 131 испитаником, од којих 119 користи асистенте засноване на вештачкој интелигенцији. Анализа је обухватила перцепцију продуктивности, различите облике когнитивног оптерећења, факторе прихватања технологије, ток рада и могуће промене у начину размишљања корисника. Резултати показују да асистенти највише доприносе ефикасности и смањењу менталног напора при рутинским задацима, док је утицај на квалитет рада и дубоку концентрацију умерени.*

Кључне речи: *вештачка интелигенција, асистенти заснивани на вештачкој интелигенцији, продуктивност програмера, когнитивно оптерећење, дубока концентрација*

Abstract – *This paper examines the impact of AI assistants on developer productivity, cognitive load and deep concentration. The study was conducted through a survey of 131 respondents, 119 of whom use AI assistants. The analysis covered perceived productivity, cognitive load, technology acceptance, workflow, and possible changes in users' ways of thinking. Results show that AI assistants contribute most to efficiency and the reduction of routine mental effort, while their impact on work quality and deep focus is more moderate.*

Keywords: *artificial intelligence, AI assistants, developer productivity, cognitive load, deep concentration*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Дину Драган, редовни професор

1. УВОД

Асистенти засновани на вештачкој интелигенцији (ВИ) представљају софтверске алате који користе велике језичке моделе и сродне технике машинског учења ради подршке у когнитивно захтевним задацима. У развоју софтвера они се користе за генерисање и прегледање кода, објашњавање решења, писање документације и проналажење грешака. Ранија истраживања и индустријски извештаји указују на раст продуктивности приликом коришћења асистената заснованих на ВИ, али и на потребу да се добијени резултати рада асистената проверавају и критички тумаче [1, 2].

Проблем који испитује овај рад јесте да ли асистенти засновани на ВИ заиста олакшавају рад програмера или само премештају напор са писања решења на његову проверу. Због тога се у раду не посматра само брзина рада, већ и когнитивно оптерећење, дубока концентрација, поверење у алате и намера да се они наставе користити. Теоријску основу чине СПЕЈС модел продуктивности, Теорија когнитивног оптерећења, Теорија тока и Модел прихватања технологије [3-6]. Посебна пажња посвећена је и ризику неквалитетног садржаја генерисаног од стране ВИ, јер он може смањити продуктивност и нарушити поверење у тимску сарадњу [7, 8].

Циљ рада је да се на основу ставова активних учесника у развоју софтвера испитају следећа питања: у којим деловима посла асистенти засновани на ВИ највише помажу, да ли заиста смањују когнитивно оптерећење или га само мењају, и да ли њихова употреба подстиче или ремети дубоку концентрацију.

Рад има следећу структуру. У другом поглављу рада описује се теоријски оквир и методологија, у трећем резултати и дискусија, у четвртом закључци и правци будућих истраживања, док је у петом наведена литература. На самом крају рада налази се биографија.

2. ТЕОРИЈСКИ ОКВИР И МЕТОДОЛОГИЈА

Продуктивност у софтверском инжењерству се не може свести само на број написаних линија кода или брзину испоруке. СПЕЈС (енг. SPACE) модел наглашава више димензија продуктивности, укључујући задовољство и добробит, перформансе, активност, комуникацију и сарадњу, као и ефикасност и ток рада [3]. Овај приступ је важан за асистенте засноване на ВИ, јер алат може убрзати рутински део посла, али истовремено захтевати додатну процену исправности резултата.

Когнитивно оптерећење је посматрано кроз разлику између унутрашњег оптерећења, које произлази из

сложености самог проблема, спољашњег оптерећења, које ствара начин представљања или технички рад око задатка, и релевантног оптерећења, које доприноси учењу и формирању менталних шема [4]. Теорија тока коришћена је за процену дубоке концентрације, док је Модел прихватања технологије коришћен за испитивање односа између лакоће коришћења, перципиране корисности и намере даљег коришћења [5, 6].

Поред потенцијалних користи, у раду је разматран и проблем неквалитетног садржаја насталог употребом ВИ, који се другим члановима тима прослеђује као да је спреман за употребу. Такав садржај може на први поглед деловати исправно, али од колега захтева додатну проверу, исправке и објашњавање. Због тога је у анализу укључено и питање поверења унутар тима. Уколико ВИ једном члану тима скраћује време рада, али другом повећава терет провере и исправљања, стварни ефекат на продуктивност може бити мањи од онога што показује појединачна самопроцена.

Истраживање је спроведено путем онлајн анкете креиране у алату Гугл Формс (енгл. Google Forms). Анкета је садржала 32 питања, претежно затвореног типа. Анкета је била отворена од 20. 1. 2026. до 25. 1. 2026. Узорак је обухватио 131 испитаника, а питања за кориснике асистената заснованих на ВИ анализирана су на подузорку од 119 испитаника. Анкета је била анонимна и дистрибуирана је у више компанија које се баве развојем софтвера, као и путем пословне мреже Линкдин (енгл. LinkedIn).

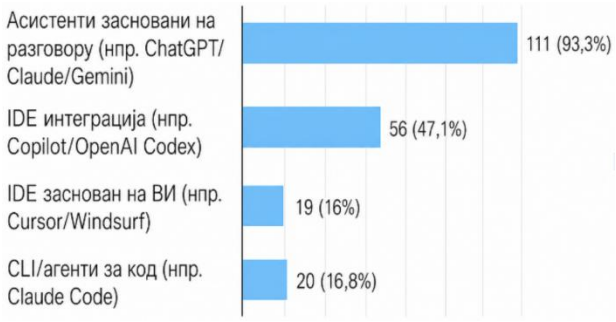
Формулисано је девет хипотеза (H1-H9), груписаних око четири целине: когнитивне подршке и когнитивног оптерећења, поверења и разумевања решења, фокуса и прихватања технологије, као и ризика повезаних са начином употребе асистената.

У обради података примењене су дескриптивна статистика, Кронбахов алфа коефицијент за проверу поузданости композитних индикатора, Спирманова корелација рангова, хи-квадрат тест независности, Ман-Витнијев U тест и Вилкоксонов тест предзначених рангова. С обзиром на то да су питања најчешће формулисана као Ликертова скала (оцењивање од 1 до 5), непараметарски тестови су били примеренији од параметарских поступака.

3. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

На питање да ли користе ВИ током програмирања или тестирања, потврдно је одговорило 119 од 131 испитаника, односно 90,8%. Преосталих 12 испитаника није наставило део анкете посвећен асистентима. Као главни разлози за некоришћење појављују се неповерење у тачност резултата и недостатак примене у оквиру тренутне позиције.

Већина испитаника који користе асистенте засноване на ВИ ослања се на алате засноване на разговору, као што су Чет-Ци-Пи-Ти (енгл. ChatGPT), Клод (енгл. Claude) или Џемини (енгл. Gemini), што чини 93,3% испитаника. Интеграције у развојно окружење, попут Копајлота (енгл. Copilot) или ОпенАИ Кодекса (енгл. OpenAI Codex), користи 47,1% испитаника. Развојна окружења чији је рад примарно заснован на ВИ користи 16% испитаника, док алате командне линије или агенте за рад са кодом користи 16,8%. Овакав резултат је у складу са ширим налазима о распрострањености алата заснованих на ВИ међу програмерима [2, 9]. Расподела коришћених типова асистената приказана је на слици 1.

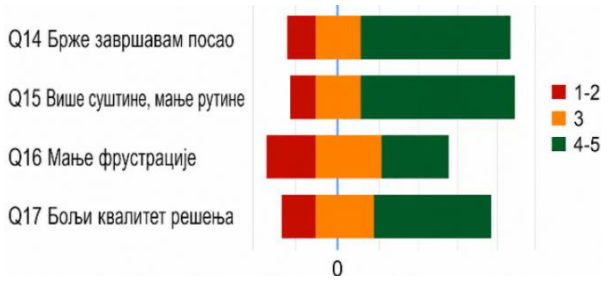


Слика 1. Учесталост коришћења различитих типова ВИ асистената

Две трећине корисника свакодневно користи асистенте засноване на ВИ. У скоро сваком радном задатку користи их 30,3% испитаника, док их 36,1% користи неколико пута дневно. Још 30,3% испитаника користи их неколико пута недељно, док је ретка употреба заступљена код малог броја испитаника. При процени удела кода генерисаног помоћу ВИ најчешће су категорије од 26% до 50%, што је навело 26,1% испитаника, и од 11% до 25%, што је навело 25,2% испитаника. Ови резултати показују да код генерисан од стране ВИ код већине испитаника не представља потпуну замену за ручно програмирање, већ помоћни алат у процесу рада.

На питање о уобичајеном начину рада са ВИ, 56,3% испитаника наводи да комбинује различите приступе у зависности од задатка. Додатних 25,2% испитаника најпре дефинише план и структуру, а затим ВИ користи као помоћ у реализацији решења, док 17,6% најчешће тражи почетно решење од ВИ које потом анализира и прилагођава. Ови резултати указују на то да испитаници углавном задржавају активну улогу у процени и обликовању добијених резултата.

Најјаснији ефекат ВИ уочен је у области продуктивности где 73,1% испитаника брже завршава посао, 73,9% се више усмерава на суштинске задатке, а 54,6% наводи бољи квалитет решења. Ставке су показале добру унутрашњу конзистентност (Кронбах α=0,79). Дистрибуција одговора на кључна питања продуктивности приказана је на слици 2.



Слика 2. Дистрибуција одговора на питања везана за продуктивност

Резултати когнитивног оптерећења показују да асистенти највише делују на техничке и рутинске аспекте рада. Чак 74,8% испитаника сматра да им ВИ

штеди менталну енергију код синтаксе, документације и шаблонског кода, док 58,8% наводи да им помаже да разложе сложен задатак. Истовремено, 81,5% испитаника мора додатно да проверава резултат рада ВИ, што указује да се напор не елиминише, већ делимично премешта на верификацију. Чешћа употреба алата слабо је, али статистички значајно, повезана са већом перципираном когнитивном подршком (ρ=0,275; p=0,002516), док је Вилкоксонов тест потврдио да је корист израженија код спољашњег него код унутрашњег оптерећења (W=498,500; p=0,0009739).

Овај налаз је значајан јер показује границу аутоматизације. Асистент заснован на ВИ може да смањи напор око синтаксе, документације, шаблонског кода и брзог проналажења решења, али не уклања потребу да програмер разуме контекст, услове исправности и последице предложене измене. Зато се добијени резултати боље тумаче као промена врсте когнитивног рада, а не као једноставно смањење укупног менталног напора.

Утицај на дубоку концентрацију је знатно сложенији. Само 23,5% испитаника сматра да им ВИ помаже да одрже фокус, а 16,8% наводи да приликом коришћења ВИ губи појам о времену и остаје дубоко фокусирано. Са друге стране, само 16,8% испитаника сматра да сугестије ВИ прекидају ток размишљања. То значи да асистенти ретко директно изазивају стање тока, али га могу подржати када смањују сувишан напор. Овај закључак потврђује и статистички значајна позитивна повезаност индекса когнитивне подршке и индекса дубоке концентрације (ρ=0,489; p=1,621×10−8).

У домену прихватања технологије, већина испитаника (84,8%) сматра да су асистенти засновани на ВИ лаки за коришћење у свакодневном раду. Ипак, најважнији фактор намере даљег коришћења није сама лакоћа употребе, већ перципирана корисност. Најјача повезаност добијена је између проширеног индекса корисности и намере даљег коришћења (ρ=0,610; p=1,859×10−13), што је у складу са претпоставкама Модела прихватања технологије. Поверење у типичне сугестије ВИ је умерено: 55,5% испитаника има позитиван став, док је 31,1% неутрално.

Додатно, веће задовољство током употребе асистената повезано је са већим осећајем продуктивности. Најјача повезаност у овом делу добијена је између смањења фрустрације и проширеног индекса перформанси који обухвата брзину, усмереност на суштину и квалитет решења (ρ=0,566; p=1,922×10−11). То значи да корисници који ВИ доживљавају као мање фрустрирајућ алат чешће препознају и његове практичне добитке.

Посебно је анализирана појава неквалитетног садржаја генерисаног ВИ. У претходних 30 дана, 37% испитаника добило је од колеге садржај генерисан помоћу ВИ који је захтевао значајне исправке. Такав садржај може имати последице на тимско поверење, јер 39,3% испитаника сматра да смањује поверење у квалитет рада и сарадњу, док је 41,2% неутрално. Овај налаз је близак налазима о феномену површно припремљеног садржаја насталог употребом ВИ, при чему такав садржај привидно штеди време једном кориснику, али ствара додатан рад другима [7].

Није потврђено да већи удео кода генерисаног помоћу асистента статистички значајно повећава забринутост због деградације сопствених вештина (ρ=0,171; p=0,0748). Међутим, већи удео генерисаног кода јесте повезан са осећајем да ВИ мења начин размишљања корисника (ρ=0,297; p=0,0017). Ово указује да корисници не морају нужно да доживљавају губитак вештина, али препознају да им алат мења стратегију решавања задатака.

Компактни преглед тачних формулација хипотеза, примењених мера и закључака дат је у Табели 1.

Табела 1. Резултати тестирања хипотеза

Хип.	Формулација и закључак
H1	Хипотеза: Програмери који чешће користе алате засноване на вештачкој интелигенцији перципирају нижи ниво когнитивног оптерећења током рада. Закључак: Делимично потврђена, јер је веза значајна, али слаба (ρ=0,275; p=0,002516).
H2	Хипотеза: Коришћење асистената заснованих на вештачкој интелигенцији има већи утицај на смањење непотребног менталног напора него на олакшавање самог проблема. Закључак: Потврђена већа корист код спољашњег оптерећења (W=498,500; p=0,0009739; r=0,302).
H3	Хипотеза: Програмери који више верују асистентима заснованим на вештачкој интелигенцији чешће имају осећај да им асистент помаже да дубље разумеју проблеме и решења. Закључак: Делимично потврђена, позитивна, али слабија веза (ρ=0,280; p=0,002058).
H4	Хипотеза: Програмери који перципирају да асистенти смањују когнитивно оптерећење чешће доживљавају дубоку концентрацију током рада. Закључак: Потврђена умерена повезаност (ρ=0,489; p=1,621×10^{-8}).
H5	Хипотеза: Већа перципирана лакоћа коришћења асистената заснованих на вештачкој интелигенцији повезана је са већом перципираном корисношћу. Закључак: Потврђена (ρ=0,404; p=5,147×10^{-6}).
H6	Хипотеза: Веће задовољство приликом коришћења асистената заснованих на вештачкој интелигенцији повезано је са већим осећајем продуктивности. Закључак: Потврђена хипотеза (ρ=0,566; p=1,922×10^{-11}).
H7	Хипотеза: Перцепција корисности асистената најјачи је предиктор намере за даљим коришћењем. Закључак: Потврђена хипотеза (ρ=0,610; p=1,859×10^{-13}).

Хип.	Формулација и закључак
H8	Хипотеза: Програмери који током рада асистента прелазе на други задатак перципирају већу ефикасност рада. Закључак: Није потврђена, смер је очекиван, али није значајан (U=1634; p=0,1980).
H9	Хипотеза: Већи удео кода генерисаног помоћу асистента повезан је са већом забринутошћу због деградације сопствених вештина. Закључак: Није потврђена, нема значајне везе са деградацијом вештина (ρ=0,171; p=0,0748).

4. ЗАКЉУЧАК

Истраживање показује да асистенти засновани на ВИ у раду програмера највише доприносе повећању ефикасности и смањењу рутинског менталног напора. Најјачи налази односе се на брже завршавање посла, усмеравање на суштинске делове задатка и смањење спољашњег когнитивног оптерећења. Ипак, резултати не подржавају закључак да се когнитивни напор у потпуности уклања. Он се делом премешта на проверу и критичко тумачење генерисаних резултата, што захтева стручно знање и одговорност корисника.
Утицај на дубоку концентрацију није директан и једнозначан. Асистенти могу створити услове за бољи фокус ако уклањају рутинске препреке, али сами по себи ретко доводе до стања тока. Перципирана корисност издваја се као кључни фактор прихватања технологије и намере даљег коришћења. Ограничења истраживања односе се на самопроцену испитаника, структуру узорка и брз развој алата. Због тога би будућа истраживања требало да комбинују анкетне податке са објективним мерама продуктивности, квалитета кода, времена утрошеног на проверу генерисаних резултата и прекида у току рада.

5. ЛИТЕРАТУРА

[1] S. Peng, et al., "The impact of AI on developer productivity: Evidence from GitHub Copilot," arXiv preprint arXiv:2302.06590, 2023.

[2] D. DeBellis, et al., "DORA 2025 State of AI-Assisted Software Development Report," Google/DORA, 2025.

[3] N. Forsgren, et al., "The SPACE of Developer Productivity: There's more to it than you think," Queue, vol. 19, no. 1, pp. 20-48, 2021.

[4] C. Clark and R. Kimmons, "Cognitive Load Theory," 2023.

[5] M. Csikszentmihalyi, "Flow: The psychology of optimal experience," 1990.

[6] D. Marikyan and S. Papagiannidis, "Technology acceptance model: A review," TheoryHub Book, 2024.

[7] K. Niederhoffer, G. R. Kellerman, A. Lee, A. Liebscher, K. Rapuano, and J. T. Hancock, "AI-Generated Workslop Is Destroying Productivity," Harvard Business Review, 2025.

[8] H. P. Lee, et al., "The impact of generative AI on critical thinking: Self-reported reductions in cognitive effort and confidence effects from a survey of knowledge workers," Microsoft Research, 2025.

[9] J. T. Liang, C. Yang, and B. A. Myers, "A large-scale survey on the usability of AI programming assistants: Successes and challenges," Software Engineering, 2024.

Кратка биографија:



Милан Ајдер, рођен 20. 5. 2000. у Новом Саду. Основне академске студије Софтверског инжењерства и информационих технологија на Факултету техничких наука у Новом Саду завршио је 2023. године. Исте године уписује мастер академске студије на истом смеру, где је положио све испите предвиђене наставним планом и програмом и стекао услов за одбрану мастер рада.
Контакт:
ajder.milan2000@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 621.38
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36BE46Djordjevic

Анализа перформанси *Zephyr* и *FreeRTOS* оперативних система на *RISC-V* архитектури процесора

Performance Analysis of Zephyr and FreeRTOS Operating Systems on RISC-V Processor Architecture

Милица Ђорђевић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОНИКА И ТЕЛЕКОМУНИКАЦИЈЕ

Кратак садржај - *У раду су приказани анализа и поређење перформанси Zephyr и FreeRTOS оперативних система на RISC-V софтверском процесору конфигурисаном на Xilinx Artix-7 FPGA платформи. Помоћу осмишљених софтверских алгоритама мерена су, а затим и поређена, трајања извршавања критичних делова оперативних система у процесорским циклусима. Резултати су прокоментарисани и упоређени са очекиваним теоријским вредностима.*

Кључне речи: *оперативни системи, RISC-V процесорска архитектура, FPGA софтверски процесор, софтверски алгоритми, поређење перформанси*

Abstract - *This paper presents an analysis and comparative evaluation of the performance of the Zephyr and FreeRTOS operating systems on a RISC-V software processor implemented on a Xilinx Artix-7 FPGA platform. By using specifically designed software algorithms, the execution times of critical operating system parts were measured in processor cycles and subsequently compared. The obtained results were analyzed and discussed in relation to the expected theoretical values.*

Keywords: *operatyng systems, RISC-V processor architecture, FPGA software processor, software algorithms, performance measurement*

НАПОМЕНА:Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био проф. др Владимир Рајс

1. УВОД

Уграђени, односно ембедед системи су компјутерски системи дизајнирани за специфичну намену, веома често ограничених ресурса и велике брзине одзива. Поред хардверских делова система као што су процесорска јединица, меморија, улазно- излазни подсистем, периферије и напајање, други једнако битан део је софтвер. Развојем технологија за израду електронских компоненти, уграђени системи су постали хардверски комплекснији, уз високу компактност и енергетску ефикасност. Задаци које ови системи извршавају и захтеви које при томе треба да испуне су се временом проширили, што је у многоме узроковало и усложњавање софтвера. Од простих програма писаних у бесконачној петљи стигло се до потребе за интеграцијом оперативних система у софтвер уграђених система.

Главни критеријум за одабир оперативног система за ембедед уређај је жељена функционалност и брзина одзива, тј. да ли је уређај предвиђен да ради у реалном времену. Уколико јесте, користе се такозвани оперативни системи за рад у реалном времену (енгл. *RTOS- Real Time Operating System*).

Приликом одабира *RTOS* система за ембедед уређај, потребно је обратити пажњу на његову поузданост, подршку за дати хардвер, потребне ресурсе за извршавање и чување кода, као и перформансе. У данашње време постоји више бесплатних оперативних система за рад у реалном времену прилагођених уграђеним системима, од којих су два најпознатија *FreeRTOS* и *Zephyr*. Овај рад се бави анализом и поређењем перформанси ова два оперативна система на *RISC-V* архитекрури процесора.

На почетку рада је описан хардвер коришћеног развојног система као и конфигурација *RISC-V* софтверског процесора. Описани су и одабрани софтверски алати коришћени при развоју система, те начини за инструментацију кода и отклањање грешака. Дат је преглед начина рада и поделе оперативних система, са посебним освртом на системе за рад у реалном времену и алгоритме распоређивања који се у њиховој имплементацији користе. Потом су анализиране структуре и начини функционисања поређених (*FreeRTOS* и *Zephyr*) *RTOS* система са нагласком на специфичностима приликом њихове интеграције у пројекат. Дато је поређење ова два система са становишта корисника и комплексности интеграције. Описани су софтверски алгоритми коришћени при мерењу перформанси система, као и разлози за одабир одређених софтверских решења. На крају рада су табеларно приказани добијени резултати, прокоментарисани и упоређени са очекиваним теоријским вредностима.

Такође је вршено и поређење са резултатима пронађеним за другу хардверску платформу. Овај рад има за циљ да укаже на битне практичне ставке приликом одабира одговарајућег оперативног система за уграђен систем, како са становишта корисника тако и са становишта перформанси, као и да прикаже практично поређење два тренутно најпознатија *RTOS* система за ову намену, *Zephyr*-а и *FreeRTOS*-а.

2. КОРИШЋЕНИ ХАРДВЕР

2.1. *Arty A7-100T* развојна плоча

Током израде овог рада, коришћена је развојна плоча *Digilent Arty A7100T*, која у себи садржи програмабилни део хардвера, *FPGA Artix-7* компаније *Xilinx*. Специјално је дизајнирана са намером да буде коришћена као систем са програмабилним софтверским процесором *RISC-V* архитектуре.
Плоча поседује порт за *UART* комуникацију који дели са *USB-JTAG*-ом, који је кориштен приликом развоја система. На располагању су и групе прекидача, светлосних диода и улазно/излазних конектора. Разлог за одабир овог развојног система лежи у једноставном повезивању са рачунаром, великој подршци софтверских алата и најбитније, могућношћу програмирања и модификовања жељеног софтверског процесора.

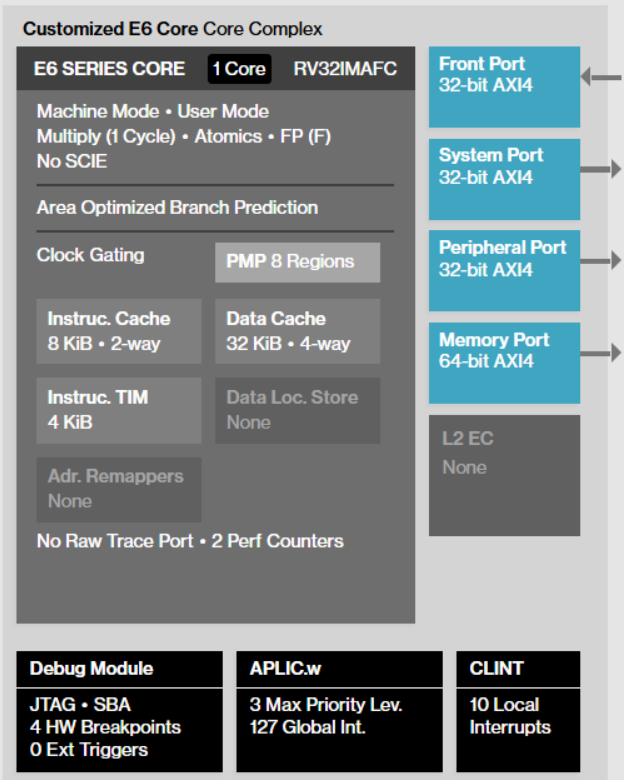
2.2. *Xilinx Artix-7 FPGA*

Поред конфигурабилних блокова, основног програмабилног дела, *Artix-7* поседује интегрисану брзу блок *RAM* меморију на чипу. Сваки блок има капацитет од 36*Kb* са подршком за двоструко улазни приступ меморији. На чипу се налази интегрисан хардверски блок за конфигурацију, управљање и генерисање сигнала такта. Доступан је и улазно-излазни подсистем који је груписан у банке, као и *PCI* интерфејс. Чип има могућност конфигурисања сигурносне аутентификације и енкрипције *FPGA* конфигурације која се на њега програмира.

2.3. Конфигурација RISC-V софтверског процесора на FPGA

Овај рад користи *Artix-7* као конфигурисани 32-битни софтверски процесор *RISC-V* архитектуре. Ову архитектуру карактериш висока скалабилност и модуларност.
Софтверски процесор је дизајниран конфигурацијом *E6* плоче компаније *Sifive* помоћу алата *Sifive Core Designer*. Комплетна конфигурација процесорског језгра приказана је на слици 1.

Сама *FPGA* конфигурација чипа се чува у екстерној флеш меморији у облику *MCS* датотеке. Остале меморије су повезане са процесорским језгром путем *TileLink* магистрале. Меморија унутар *FPGA* је реализована као низ меморијских *BRAM* (енгл. *Block RAM*) блокова. Конфигурацијом ових блокова добијена је *SRAM* меморија од 128KB. Систем садржи и емулирану *ROM* меморију величине 256KB, која је реализована као *FPGA BRAM*, другим речима њен садржај се губи престанком напајања, али приступи и брзине су моделоване према реалној *ROM* меморији.



Слика 1. Конфигурација процесорског језгра

Од брзих меморија, процесор у својој конфигурацији поседује инструкциони кеш, кеш за податке као и интегрисану брзу инструкциону меморију од 4KB. *ITIM* меморија је корисна приликом интеграције оперативних система, јер за разлику од кеша на који корисник не утиче директно, у *ITIM* је могуће сместити временски критичан део кода и на тај начин убрзати систем. У оквиру конфигурације процесорског језгра додат је *PMP* уређај, који представља механизам за контролу приступа меморијским регијама, посебно важан у имплементацији корисничког простора оперативног система. Конфигурисани систем подржава прекиде кроз два модула: *CLINT* и *APLIC*. Периферни контролери као што су *GPIO*, *SPI* и *UART* повезују се на процесорско језгро преко стандардизованих системских магистрала. Приликом мерења пребацивања контекста конфигурисани су *GPIO* прекиди, а за иницијалну инструментацију система *UART*. За потребе развоја и анализе система, плоча садржи модул за инструментацију кода са подршком за *JTAG* интерфејс. Сви наведени делови су интегрисани у коначан *FPGA* дизајн и спуштени на систем.

3. ПОВЕЗИВАЊЕ И ПРОГРАМИРАЊЕ ЦЕЛОГ СИСТЕМА

Систем је повезан са рачунаром путем два улаза. Један је преко *USB* интерфејса типа A, који осим напајања система од 5V, поседује контролер који омогућава и контролише комуникацију преко *UART*-а и *JTAG* програмирање *FPGA* слике на *Artix-7*.
У сврху спуштања и инструментације кода, систем је повезан на други улаз рачунара преко *Olimex ARM-*

USB-Tiny-H хардверског модула који представља интерфејс између рачунара и *FPGA* дела плоче, са програматором базираном на *FTDI* чипу, који обезбеђује конверзију између *USB* протокола и *JTAG/SWD* сигнала. Овај улаз служи за програмирање и инструментацију кода на самом софтверском процесору.

3.1. Коришћени софтверски алати за отклањање грешака у систему

У процесу развоја за потребе анализе система и отклањања грешака коришћени су *OpenOCD* и *GDB*. Ови софтверски алати представљају стандардне и веома популарне механизме за отклањање грешака у уграђеним системима, омогућавајући повезивање персоналног рачунара са плочом и комуникацију између њих.

OpenOCD је алат намењен инструментализацији кода и система преко *JTAG/SWD* интерфејса. Његова основна улога је да преведе команде примљене са рачунара у сигнале разумљиве хардверу и на тај начин омогући комуникацију са плочом.

GDB је званични алат за отклањање грешака *GNU* пројекта, који не може директно да управља хардвером, већ је првенствено намењен за рад у симулацијама или на програмима који се извршавају у корисничком простору.

OpenOCD функционише као сервер: прима команде од *GDB*-а преко *TCP/IP* конекције и преводи их у *JTAG/SWD* сигнале за процесор. У комбинацији са *GDB*-ом, *OpenOCD* добија виши степен апстракције: *GDB* омогућава рад са симболима, функцијама и променљивим у програму.
Хардверски специфични делови система и иницијализација комуникације се налазе у *OpenOCD* конфигурационој датотеци.

4. ОПЕРАТИВНИ СИСТЕМИ

Оперативни систем је по дефиницији слој софтвера који управља ресурсима рачунара за своје кориснике и њихове апликације. На основу сврхе, величине (односно комплексности) и захтева за брзином одзива, оперативни системи се класификују у више категорија. Тако постоје оперативни системи опште намене, који су намењени широком спектру апликација и корисничких захтева, затим ембедед оперативни системи оптимизовани за рад на системима са ограниченим ресурсима, као и оперативни системи за рад у реалном времену (*RTOS*) који гарантују одзив у веома уском, ограниченом временском интервалу. Фокус рада је управо на анализи последње врсте система.

4.1. Оперативни системи за рад у реалном времену

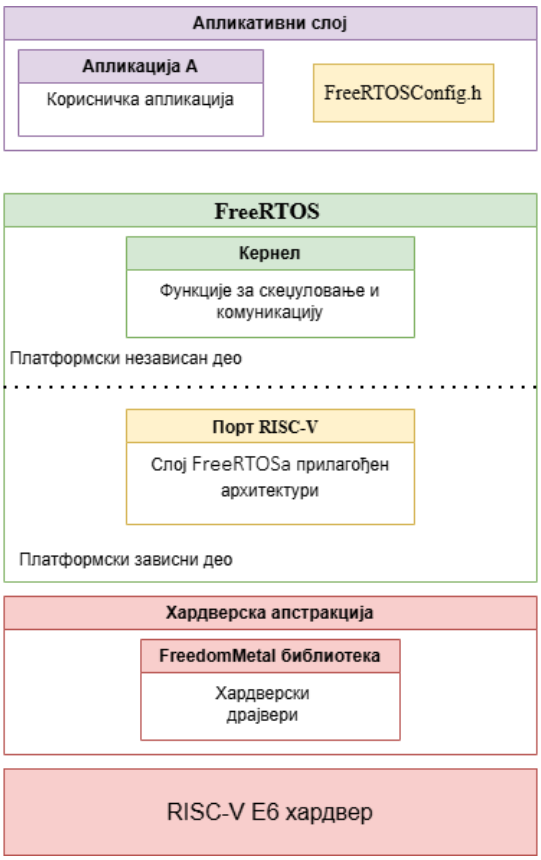
Оперативни системи за рад у реалном времену су системи дизајнирани да контролишу извршавање временски критичних задатака, гарантујући предвидивост и стабилност у раду. Ови системи се најчешће користе при имплементацији софтвера за управљачке јединице у аутомобилској индустрији, авио индустрији, роботици, медицинским уређајима и свим осталим ембедед системима у којима кашњења и грешке у извршавању могу имати значајне последице.
На основу бризине одзива *RTOS* системи се деле на *Soft RTOS*-е код којих мања кашњења одзива немају веће последице на систем и *Hard RTOS*-е код којих минимална кашњења могу довести до отказа система. У зависности од конфигурације, *FreeRTOS* и *Zephyr* је могуће користити и као *Hard* и као *Soft RTOS*-е. Друга подела *RTOS* система заснива се на начину на који се врши пребацивање извршавања (контекста) са једног задатка на други. У случају кооперативних система покретање наредног задатка врше унутар задатка који се тренутно извршава, те је сваки задатак одговоран да довољно често позове функцију распоређивања како не би дошло до блокирања система. Код преемптивих система покретање наредног задатка врше се форсирано, позивом функције за распоређивање од стране оперативног система, изван функције задатка који се тренутно извршава. У оквиру овог рада, мерена су трајања пребацивања контекста у оба случаја, тј. када су системи конфигурисани и као преемптиви и као кооперативни.

4.2. *FreeRTOS* оперативни систем

FreeRTOS је бесплатан, минималистички оперативни систем под *MIT* лиценцом, за чију је основну функционалност потребно укључити само три основне датотеке кернела. У пројекат се интегрише на исти начин као библиотека, а не дефинише систем изградње и развојно окружење. Током израде овог рада *FreeRTOS* је интегрисан у неколико корака. Прво је преузет изворни код са *Git* репозиторијума, затим је одабрано развојно окружење *Freedom Studio* компаније *SiFive* прилагођено раду на њиховим плочама, а затим је интегрисана хардверска библиотека произвођача. Систем изградње је дефинисан преко система *Make* у оквиру развојног окружења, као и систем за инструментацију кода. Хардверски део је зависан од библиотеке произвођача, те саме имплементације зависи сложеност укључивања модула. Дијаграм основних слојева *FreeRTOS*-а неопходних за интеграцију у пројекат приказан је на слици 2.

4.3. *Zephyr* оперативни систем

Zephyr оперативни систем за рад у реалном времену, намењен првенствено ембедед уређајима, представља један од тренутно најразвијенијих *RTOS* система те сврхе, познат по својој високој модуларности и великом броју подсистема. *Zephyr* је имплементиран као комплетна платформа са сопственом структуром у коју корисник може да интегрише своју апликацију. Подсистеме је могуће једноставно укључити *Kconfig* системом. За апстракцију хардвера користи принцип хардверског стабла, тзв. *Devicetree.* Хардверско стабло је организовано као хирерархија чворова у оквиру које сваки чвор представља један хардверски елемент.

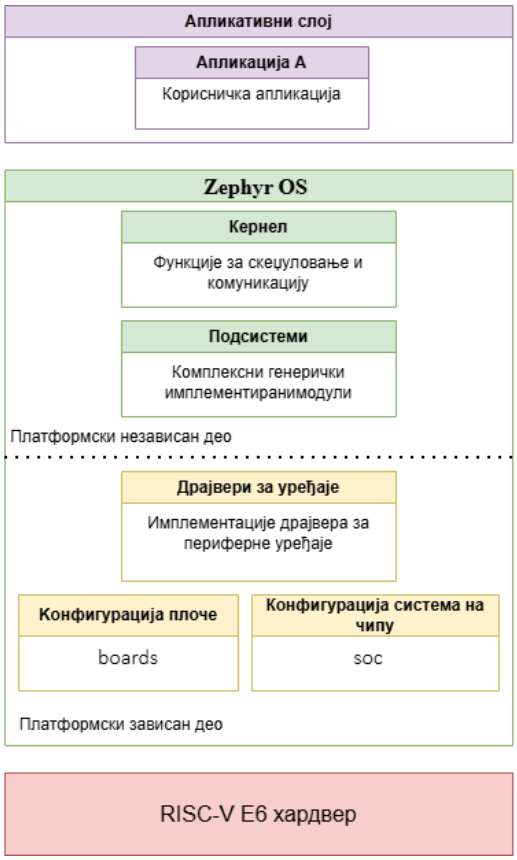


Слика 2. Основни слојеви *FreeRTOS*-а

Хардверски елемент може бити уређај (*UART* периферија), подсистем (*GPIO* контролер) или елемент (*LED*). Сваки чвор садржи атрибуте који дефинишу параметре тог хардверског дела, као што су адреса у меморијском простору, број прекида, конфигурација пинова или брзина комуникације. Оваква структура омогућава јасно раздвајање хардверског описа од изворног кода. За потребе овог рада, генерисано је хардверско стабло помоћу раније поменутог алата *Sifive Core Designer*. За разлику од *FreeRTOS-a,* где није постојао стандардизован систем за изградњу, *Zephyr* систем је заснован на *CMake-y*.
На слици 3 је приказана структура слојева *Zephyr* оперативног система.

4.4. Поређење *FreeRTOS* и *Zephyr* оперативних система са становишта корисника

FreeRTOS је дуго година био најпопуларнији *RTOS* систем за микроконтролере, док је *Zephyr* новије решење које га је временом сустигло у популарности. Једна од кључних предности *FreeRTOS-a* је његова једноставна интеграција у већ постојећи пројекат. *Zephyr* је сам по себи екосистем, долази са својим дефинисаним окружењем за развој и изградњу у које је потребно уклопити структуру пројекта. Иницијална интеграција *Zephyr*-а је комплекснија, али је систем знатно модуларнији и конфигурабилнији, те подржава развој исте апликације за више хардверских платформи истовремено специфицирањем плоче приликом покретања изградње. *Zephyr* у оквиру *West* алата нуди подршку за генерацију извештаја о потрошњи *RAM* и *ROM* меморије након изградње. Још једна битна разлика је имплементација корисничког простора, који је у *Zephyr*-у потпутно одвојен од кернелског и не захтева хардверски систем заштите меморије, док *FreeRTOS* подржава корнички простор само у оквиру привилегованих задатака када се интегрише хардверска заштита меморије. Са друге стране, кориснички простор *Zephyr-a* додаје време односно оптерећење при сваком системском позиву, те успорава рад система.



Слика 3. Основни слојеви *Zephyr*-а

У случају мање захтевних пројеката и хардвера веома ограничених ресурса боље је користити *FreeRTOS,* а у случају комплекснијих система или озбиљнијих пројеката које је потребно прилагођавати различитим платформама и одржавати, *Zephyr* је боље решење.

4.5. Поређење перформанси FreeRTOS и Zephyr оперативних система

Приликом мерења перформанси и поређења *RTOS* система, фокус је на мерењу временског одзива и додатног оптерећења процесора које оперативни систем уноси својом интеграцијом. Значајан критеријум при одређивању квалитета система је и потребна радна меморија за извршавање и меморија за складиштење кода. Сва временска мерења су вршена у процесорским циклусима како би резултати били независни од фреквенције рада те упоредиви са резултатима других платформи.

4.6. Пребацивање контекста између задатака

За мерење додатног оптерећења које оперативни систем уноси при пребацивању контекста са једног на други задатак, коришћени су алгоритми засновани на

контроли тока извршавања задатака бинарним семафорима. Разлог за одабир овог приступа је могућност примене истог механизма на сва вршена мерења, те могућност поређења резултата.
У случају добровољног пребацивања контекста са једног задатка на други, задаци су истог приоритета, а кориштен је „пинг-понг“ алгоритам где се задаци наизменично блокирају и препуштају извршавање другом инкрементовањем бинарног семафора. У овом случају, *Zephyr* уноси мање оптерећење око трећину.
У случају принудног пребацивања контекста, где задатак нижег приоритета периодично одблокира извршавање задатка вишег приоритета семафором. резултати су приближно једнаки.
Ако се упореде додатна оптерећења између ових тестова, у оквиру истог система, може се приметити да је у случају *Zephyr-a* добровољно пребацивање контекста брже од принудног, а код *FreeRTOS-a* је обрнуто. На резултате мерења утиче имплементација како распоређивача тако и функција бинарних семафора на оперативном систему.

4.7. Пребацивање контекста између задатка и прекидне рутине

За мерење додатог оптерећења при пребацивању контекста са задатка на прекидну рутину, из задатка је мењано стање излазног *GPIO* пина, који је кратко спојен на други улазни *GPIO* пин и на тај начин је у петљи контролисано изазиван прекид. Добијени су слични резултати додатог оптерећења за оба оперативна система. Ово мерење не укључује синхронизационе објекте, те је једино оптерећење које је додато у систем осим промене контекста извршавање функције за промену стања пина, што не зависи од имплементације оперативног система. У случају додатног оптерећења при пребацивању контекста са прекидне рутине на задатак, кориштен је прекид на тастеру који затим одблокира задатак семафором. У овом случају је *Zephyr* скоро два пута бржи.

4.8. Анализа потребне меморије за код

Што се тиче потребне меморије за складиштење кода, *FreeRTOS* заузима 4.1 kB за кернел, док *Zephyr* узима 6,7kB. Али, укупна меморија потребна да се интегрише оперативни систем обухвата и хардверски део кода, који је у случају *Zephyr*-а доста модуларан и могу се избацити сви некориштени модули, те је укупно минимално заузеће меморије у случају ове платформе за *Zephyr* 12kB, а за *FreeRTOS* 22kB.

5. ЗАКЉУЧАК

Приликом анализе добијених резултата, утврђено је да *Zephyr* има више детерминистичко понашање у односу на *FreeRTOS*, односно да су времена потребна за промене контекста мање зависна од конкретних услова у систему и разлога пребацивања. Рад је показао да је *Zephyr* боље користити у већим системима који захтевају одржавање и стабилност, а *FreeRTOS* за прототипе и системе са мање ригорозним захтевима.

6. ЛИТЕРАТУРА

[1] Факултет техничких наука, Нови Сад, „Развој софтвера за дигиталне микроконтролере“, наставни материјал. (приступљено- март 2026.)

[2] Mouser, „Arty A7-100T Development Board - Digilent – Datasheet“ Arty A7-100T Development Board - Digilent | Mouser (приступљено - април 2026.)

[3] FPGAKey, „XC7A100T-2FGG484I – Datasheet“. https://www.fpgakey.com/xilinx-parts/xc7a100t-2fgg484i?srsltid=AfmBOorm5mtVZb24aNd1EStN4mF_puN2YSOJB-IsNBccLrBa6mD_k2aI (приступљено - мај 2026.)

[6] A. Eliasz,*“Zephyr RTOS Embedded C Programming”*, New York, 2024.

[7] R. Johnson,*“ Real-Time Applications with FreeRTOS: Definitive Reference for Developers and Engineers”*, New York, 2025.

[8] E. White,*“ Making Embedded Systems”*, Sebastopol, CA, 2011.

[9] Званични сајт са пројектном документацијом и описом рада *FreeRTOS* оперативног система https://www.freertos.org/ (приступљено - април 2026.)

Кратка биографија:

Милица Ђорђевић је рођена у Сремској Митровици 1997. год. Дипломирала на Факултету техничких наука у Новом Саду. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Електротехнике и рачунарства – Примењена електроника одбранила је 2026.год.
Контакт:
micadjordjevic6@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 4.4
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36BE47Radovic

Пројектовање и имплементација архитектуре великих скупова података за прикупљање, обраду и анализу *GitHub* догађаја

Design and Implementation of a Big Data Architecture for Collecting, Processing, and Analyzing GitHub Events

Бојан Радовић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – РАЧУНАРСТВО И АУТОМАТИКА

Кратак садржај – *У овом раду представљено је софтверско рјешење за прикупљање, обраду и анализу GitHub догађаја које интегрише пакетну обраду и обраду токова података у реалном времену. Уведен је приступ за оцјењивање и вредновање ентитета у оквиру платформе GitHub кроз метрику скор Gazer. Рад описује архитектуру система и примјере његове употребе. Резултати показују да предложено рјешење омогућава поређење ентитета на основу више димензија, као и анализу GitHub података прилагођену различитим типовима корисника.*

Кључне речи: *GitHub* догађаји, анализа података, пакетна обрада података, обрада токова података у реалном времену, метрика скор *Gazer*

Abstract – *This paper presents a software solution for collecting, processing, and analyzing GitHub events that integrates batch processing and real-time stream processing. An approach for evaluating and ranking entities within the GitHub platform is introduced through the Gazer Score metric. The paper describes the system architecture and provides examples of its use. The results demonstrate that the proposed solution enables the comparison of entities across multiple dimensions, as well as the analysis of GitHub data tailored to different types of users.*

Keywords: *GitHub events, data analysis, batch data processing, real-time stream processing, Gazer Score*

1. УВОД

Савремени развој софтвера у великој мјери заснива се на употреби рјешења отвореног кода (енгл. *open source*), која представљају основу значајног броја комерцијалних и некомерцијалних софтверских система. Велики дио ових пројеката развија се и одржава у оквиру платформе *GitHub*, која омогућава сарадњу великог броја корисника, организација и заједница широм свијета.

Као резултат таквог начина развоја, платформа *GitHub* генерише огромне количине података о активностима корисника, развоју репозиторијума и интеракцијама унутар софтверских пројеката. Ови подаци представљају значајан извор информација који се могу користити за анализу развојних процеса, праћење трендова, као и процјену утицаја појединачних ентитета у оквиру екосистема.

1.1. Мотивација

Мотивација произилази из потребе за дубљим и свеобухватнијим разумијевањем активности у оквиру рјешења отвореног кода и платформи за управљање изворним кодом. Иако постоје различити алати за аналитику *GitHub* података, већина њих ограничена је у погледу детаљности, флексибилности и могућности прилагођавања специфичним потребама корисника. Постојећа рјешења пажњу усмјеравају на појединачне метрике, као што су број звјездица или активности комитовања, док недостаје интегрисан приступ који обухвата више аспеката понашања корисника, динамику развоја репозиторијума и карактеристика на нивоу организације. Такође, не постоје јасно дефинисане метрике за вредновање ентитета у оквиру платформе *GitHub* на основу њихове активности, утицаја и релевантности. Постојећи приступи најчешће се заснивају на изолованим метрикама активности, што не омогућава свеобухватну процјену утицаја и значаја појединачних ентитета.

1.2. Циљеви и задаци

Циљ овог рада је омогућавање анализе великих скупова података које генерише платформа *GitHub*, са пажњом усмјереном на могућност прикупљања, обраде, складиштења и визуализације података о активностима корисника, репозиторијума и организација. Битно је омогућити досљедност и упоредивост аналитичких приказа за различите типове корисника, уз прилагођавање начина визуализације њиховим специфичним потребама и нивоима детаљности. Такође, један од циљева је дефинисање начина вредновања ентитета у оквиру платформе *GitHub* на основу њихове активности, утицаја и релевантности. Остваривање наведених циљева захтијева пројектовање софтверског рјешења које комбинује различите модуле: пакетну обраду

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Владимир Димитриески, ванр. проф.

података, обраду токова података у реалном времену, оркестрацију процеса обраде података, као и визуализацију резултата.

1.3. Структура рада

Рад је организован у 8 поглавља. У првом поглављу представљени су мотивација, циљеви и задаци рада. Друго поглавље даје преглед постојећих рјешења из области анализе *GitHub* догађаја. У трећем и четвртом поглављу дефинисане су битне изведене метрике. Пето поглавље представља архитектуру софтверског рјешења. Шесто поглавље даје примјер употребе софтверског рјешења. Седмо поглавље даје закључак и правце даљег развоја. Осмо поглавље садржи списак коришћене литературе.

2. Преглед постојећег стања у области

У наставку представљене су најзначајније платформе и алати који омогућавају аналитику над *GitHub* догађајима [1].

2.1. *GitLume*

GitLume [2] представља платформу намијењену анализи активности корисника и репозиторијума на платформи *GitHub*. Основна намјена система је праћење развојних активности и продуктивности корисника кроз анализу историје измјена кода и развоја пројеката током времена. Платформа омогућава визуализацију активности на нивоу корисника и репозиторијума, пружајући увид у број активности комитовања, учесталост доприноса и динамику развоја софтверских пројеката. Посебна пажња посвећена је индивидуалној активности програмера, укључујући анализу континуитета рада, обима доприноса и промјена у репозиторијуму. Захваљујући једноставном корисничком интерфејсу и пажњи усмјереној на визуелизацију активности, *GitLume* омогућава брз увид у стање и развој репозиторијума, као и праћење ангажованости појединачних учесника у софтверским пројектима.

2.2. *Augur*

Augur [3] представља платформу за анализу рјешења отвореног кода која је развијена у оквиру иницијативе *CHAOSS* (енгл. *Community Health Analytics for Open-Source Software*). Основна сврха платформе је прикупљање и анализа података о активностима корисника, репозиторијума и заједница које учествују у развоју софтвера. Платформа прикупља податке из различитих извора, укључујући *GitHub* репозиторијуме, системе за евиденцију и праћење проблема (енгл. *issue trackers*) и системе за контролу верзија, након чега их обрађује и трансформише у аналитичке показатеље. На основу прикупљених података могуће је анализирати активности сарадника, динамику развоја пројеката, брзину одговора на пријављене проблеме и степен укључености заједнице. На овај начин платформа омогућава организацијама и истраживачима да стекну увид у карактеристике и развојне трендове заједнице која учествује на рјешењима отвореног кода.

2.3. *GrimoireLab*

GrimoireLab [4] представља платформу за анализу софтверских пројеката која је развијена у оквиру иницијативе *CHAOSS*. Основна сврха платформе је прикупљање, обрада и визуализација података из различитих извора, укључујући *GitHub*, *GitLab*, листе е-поште, системе за евиденцију и праћење проблема и друге системе који се користе у развоју софтвера. Платформа омогућава изградњу свеобухватне слике о „здрављу“ софтверских пројеката, кроз анализу активности заједнице, брзине развоја, одзива на проблеме и доприноса спољних сарадника.

2.4. Идентификовани проблеми и могућа унапређења

Анализиране платформе пружају значајне могућности за прикупљање, обраду и визуализацију података из платформе *GitHub*. *GitLume* усмјерен је на анализу активности корисника и репозиторијума, *Augur* на праћење стања и одрживости рјешења отвореног кода, док *GrimoireLab* омогућава интеграцију и анализу података из већег броја извора. Ипак, уочава се простор за додатно унапређење постојећих приступа. Постојећа рјешења најчешће се ослањају на приказ појединачних статистичких показатеља и метрика, док је могућност интегрисаног вредновања и рангирања различитих типова ентитета ограничена. Корисници, репозиторијуми и организације посматрају се кроз засебне скупове показатеља, без јединственог модела који би омогућио њихово поређење на основу више аспеката активности и утицаја. Додатно, постојеће платформе углавном нуде униформне аналитичке приказе, независно од типа корисника и његових потреба. Због тога постоји потреба за рјешењем које омогућава прилагођене аналитичке приказе за различите типове корисника сходно њиховим случајевима коришћења.

3. ДЕФИНИЦИЈА СЕСИЈЕ РАЗВОЈНИХ АКТИВНОСТИ

Сесија развојних активности представља временски континуиран период активности корисника, у оквиру којег корисник интерагује са осталим ентитетима кроз различите активности, при чему временски размак између сусједних догађаја не прелази унапријед дефинисани праг неактивности. Формално, нека је дат уређен низ догађаја једног корисника:

$$E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\},\ t(e_i) \leq t(e_{i+1}) \quad (1)$$

гдје $t(e_i)$ представља временску ознаку догађаја. Сесија развојних активности дефинише се као максималан подниз узастопних догађаја $S \subseteq E$ такав да важи:

$$t(e_i) - t(e_{i-1}) \leq \Delta \quad (2)$$

гдје је Δ праг неактивности (енгл. $session\ gap$). У случају да је:

$$t(e_i) - t(e_{i-1}) > \Delta \quad (3)$$

сматра се да започиње нова сесија развојних активности.

Сесија развојних активности представља битну метрику за израчунавање скора *Gazer*, јер омогућава идентификацију континуиране активности корисника.

На овај начин добија се бољи увид у стварну динамику рада, будући да се појединачни догађаји не посматрају изоловано, већ у оквиру логички повезаних цјелина.

4. ДЕФИНИЦИЈА МЕТРИКЕ СКОР *GAZER*

Посматрање појединачних метрика отежава објективно вредновање и међусобно поређење ентитета, јер свака од њих описује само један аспект њихових развојних активности. Због тога уведена је метрика скор *Gazer*, која обједињавањем више различитих метрика омогућава објективније вредновање и поређење ентитета. Метрика скор *Gazer* рачуна се различито за сваки тип ентитета али сви модели заснивају се на јединственом концептуалном оквиру који обухвата четири кључне димензије:

1. **Активност** (интензитет развојних активности),
2. **Колаборацију** (степен укључености више корисника и организација у процес развоја),
3. **Квалитет** (одржавање и стабилност система) и
4. **Популарност** (интересовање заједнице за пројекат).

Сваку од наведених димензија карактерише једна или више метрика које описују одговарајући аспект ентитета. У зависности од типа ентитета, поједине димензије имају различиту релевантност и сходно томе различите тежине у коначној метрици.
Нека је:

- E скуп свих типова ентитета система, $E = \{\text{организација}, \text{репозиторијум}, \text{корисник}\}$
- $e \in E$ посматрани тип ентитета система и
- T временски интервал анализе.

Тада се скор *Gazer* дефинише као:

$$Gazer\ Score(e,T) = \sum_{i=1}^{n} w_i * (e,T) \qquad (4)$$

гдје је:

- $f_i(e,T)$ функција која мјери вриједност метрике типа i и
- w_i тежински коефицијент.

Тежински коефицијенти у оквиру метрике скор *Gazer* дефинисани су хеуристички, на основу процјене аутора рада о релативном значају појединих активности.

4.1. СКОР *GAZER* ПОЈЕДИНАЧНОГ КОРИСНИКА

Појединачни корисник представља ентитет платформе *Github* и типа корисника пројектованог система који учествује у развоју и доприноси пројектима отвореног кода. У наставку приказана је формула за рачунање скора *Gazer* за појединачног корисника.

$$\begin{aligned} Gazer\ Score(e,T) \\ &= 2 * f_{grane}(e,T) \\ &+ 2 * f_{tagovi}(e,T) \\ &+ 2 * f_{sesije}(e,T) \\ &+ 4 * f_{pr}(e,T) \\ &+ 5 * f_{zvjezdice}(e,T) \\ &+ 5 * f_{pratioci}(e,T) \end{aligned} \qquad (5)$$

гдје су: f_{grane}(e, T) број направљених грана; f_{tagovi}(e, T) број направљених тагова; f_{sesije}(e, T) број сесија развојних активности; f_{pr}(e, T) број захтјева за усвајање измјена; $f_{zvjezdice}$(e, T) број добијених звјездица и $f_{pratioci}$(e, T) број пратилаца.

5. АРХИТЕКТУРА СОФТВЕРСКОГ РЈЕШЕЊА

Софтверско рјешење организовано је као скуп међусобно повезаних, али функционално раздвојених модула, који заједно омогућавају прикупљање, обраду, складиштење, оркестрацију и визуализацију података. Процесирање података заснива се на јасној подјели између модула за пакетну обраду и модула за обраду токова података. Пакетна обрада намијењена је периодичној обради већих количина историјских података, док је модул за обраду токова података задужен за континуирано прикупљање и обраду догађаја у реалном времену. Изнад ова два слоја налазе се модули оркестрације и визуализације, чија је улога координација извршавања процеса и презентација резултата крајњим корисницима. Битно је напоменути да су подаци организовани по принципима архитектуре Медаљон.

5.1. Модул за пакетну обраду података

Пакетна обрада података у систему реализована је кроз низ процеса који се извршавају над унапријед дефинисаним временским интервалом. У оквиру овог модула имплементиране су три процесне компоненте. Компонента за прикупљање података имплементирана је као *Python* скрипта која је задужена за преузимање података из екстерних извора, укључујући *GH Archive*, *GitHub REST* и *GitHub GraphQL API*. Прикупљени подаци уписују се у бронзани слој складишта података, Компонента за трансформацију имплементирана је као *Spark* посао који обрађује податке из бронзаног и уписује у сребрни слој складишта података. Компонента за учитавање такође је имплементирана као *Spark* посао, чија је улога да на основу обрађених података рачуна агрегиране статистике за дефинисани временски период и уписује их у базу података *PostgreSQL* ради даље анализе и визуализације.

5.2. Модул за обраду токова података

Слој за обраду токова података обухвата механизме за континуирано прикупљање и обраду података који пристижу из екстерних извора у реалном времену. Овај слој имплементиран је коришћењем технологија из екосистема *Apache Kafka*, које омогућавају поуздан пренос, обраду и складиштење токова података. Циљ обраде је израчунавање и сервирање статистичких показатеља над догађајима груписаним у временске прозоре фиксне дужине. Модул за обраду токова података састоји се од четири компоненте. Генератор је компонента задужена за прикупљање података из екстерних извора, првенствено *GitHub REST API*-ја, и њихово објављивање на Кафка теме. Аналајзер је компонента која чита податке са Кафка тема и врши израчунавање статистичких показатеља у реалном времену. Конектор је компонента задужена за упис израчунатих статистика, припремљених за сервирање у базу података *PostgreSQL*. Регистар шема је компонента која омогућава централизовано

управљање шемама токова података који се размјењују преко Кафка тема.

5.3. Модул за оркестрацију

Оркестрациони модул задужен је за управљање извршавањем процесних компоненти пакетне обраде и координацију њиховог међусобног рада. Као оркестратор у оквиру система користи се алат *Apache Airflow* који омогућава дефинисање и аутоматизацију сложених токова обраде података кроз модел усмјереног ацикличног графа (енгл. *Directed Acyclic Graph, DAG*). Примјена алата *Airflow* омогућава јасно раздвајање одговорности између компоненти задужених за обраду података и компоненти задужених за управљање њиховим извршавањем. На овај начин логика обраде остаје независна од механизама планирања и оркестрације, што доприноси већој модуларности и лакшем одржавању система. Поред управљања редослиједом извршавања, *Airflow* омогућава дефинисање зависности између процеса, периодично покретање задатака, праћење статуса извршавања, као и аутоматско руковање грешкама и поновно покретање неуспјешних процеса. Централизовано управљање токовима обраде омогућава већу поузданост и контролу над процесима пакетне обраде [5].

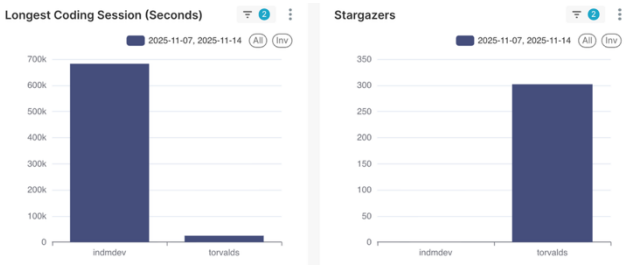
5.4. Модул за визуализацију

Визуализациони модул представља кориснички оријентисан дио архитектуре чија је основна улога презентација резултата обраде података кроз интерактивне аналитичке приказе. Овај модул обједињује резултате пакетне обраде и обраде токова података у реалном времену и омогућава њихово јединствено приказивање крајњим корисницима. За визуализацију података и приказ аналитичких резултата користи се *Apache Superset*, алат намијењен изградњи аналитичких приказа и истраживању података. *Superset* је повезан са базом података *PostgreSQL*, у коју се уписују резултати добијени из пакетне обраде и обраде у реалном времену. На основу података у бази креирани су интерактивни аналитички прикази, који омогућавају анализу статистичких показатеља и праћење активности корисника, организација и репозиторијума кроз различите временске интервале. Кориснички интерфејс омогућава филтрирање, поређење и истраживање података кроз више перспектива, чиме се корисницима омогућава брже доношење закључака и ефикасније коришћење аналитичких резултата [6].

6. ПРИМЈЕР УПОТРЕБЕ СОФТВЕРСКОГ РЈЕШЕЊА

У наставку представљен је примјер употребе софтверског рјешења из перспективе крајњег корисника. Начин коришћења система и приступ контролним таблама зависе од типа корисника и његових аналитичких потреба. Свака контролна табла садржи филтере *period* и *login*, који омогућавају филтрирање података приказаних на графиконима према изабраним вриједностима.

На слици 1 приказан је дио контролне табле намијењене појединачном кориснику. Представљено је поређење 2 корсника: *torvalds* и *indmdev* за временски период који почиње 2025.11.07. и завршава се 2025.11.14. На графицима приказано је поређење трајања најдуже сесије развојних активности и броја звјездица добијених на репозиторијумима за одабрани период.



Слика 1. Примјер поређења трајања најдуже сесије развојних активности и броја звјездица добијених на репозиторијумима

7. ЗАКЉУЧАК

Анализирана су постојећа рјешења из области аналитике *GitHub* података и идентификована њихова ограничења. На основу уочених недостатака пројектована је и имплементирана архитектура система великих скупова података за прикупљање, обраду и анализу *GitHub* догађаја. Предложено рјешење омогућава интеграцију података из више извора, вредновање и међусобно поређење ентитета као и визуализацију добијених аналитичких резултата кроз контролне табле прилагођене различитим типовима корисника.

Могући правци даљег развоја обухватају разматрање имплементације архитектуре Капа, увођење додатних метрика и модела за рангирање, као и интеграцију са другим платформама за управљање удаљеним *Git* репозиторијумима.

8. ЛИТЕРАТУРА

[1] *"GitHub event types"*, Приступљено: 23. април 2026. [*Online*]. Доступно на: https://docs.github.com/en/rest/using-the-rest-api/github-event-types?apiVersion=2026-03-10

[2] *"GitLume"*, Приступљено: 23. април 2026. [*Online*]. Доступно на: https://gitlume.com

[3] "*Augur Project, GitHub repository"*, Приступљено: 23. април 2026. [*Online*]. Доступно на: https://github.com/augurlabs/augur

[4] "*GrimoireLab*", Приступљено: 23. април 2026. [*Online*]. Доступно на: https://chaoss.github.io/grimoirelab

Кратка биографија:

Бојан Радовић завршио је основне академске студије 2023. године на Факултету техничких наука у Новом Саду, студијски програм Рачунарство и аутоматика.
Контакт: rbojan2000@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 4.4
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36BE48Djukanovic

Упоредна евалуација приступа *2PC*, *TCC* и *Saga* за управљање дистрибуираним трансакцијама у микросервисној архитектури

Comparative evaluation of 2PC, TCC, and Saga approaches for distributed transaction management in microservice architecture

Иван Ђукановић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – СОФТВЕРСКО ИНЖЕЊЕРСТВО И ИНФОРМАЦИОНЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ

Кратак садржај – *У овом раду приказана је имплементација и емпиријска компаративна анализа три софтверска приступа за управљање дистрибуираним трансакцијама у микросервисној архитектури: Двофазно потврђивање глобалне трансакције (2PC), Try-Confirm-Cancel (TCC) и Saga. Приступи су развијени у екосистему Java коришћењем радног окружења Quarkus. Квантитативно испитивање обухватило је мјерење перформанси (пропусност и кашњење) под високим оптерећењем помоћу алата k6, као и евалуацију отпорности на отказе убризгавањем мрежних грешака преко алата Toxiproxy. Резултати показују супериорност образаца Saga и TCC у погледу скалабилности и пропусности у односу на блокирајући протокол 2PC, чиме дају јасне смјернице за избор оптималног трансакционог модела у дистрибуираним системима.*

Кључне речи: *дистрибуиране трансакције, микросервиси, 2PC, TCC, Saga.*

Abstract – *This paper presents the implementation and empirical comparative analysis of three software approaches for managing distributed transactions in microservice architectures: Two-Phase Commit (2PC), Try-Confirm-Cancel (TCC), and Saga. The approaches were developed within the Java ecosystem using the Quarkus framework. Quantitative evaluation included performance testing (throughput and latency) under high load using the k6 tool, as well as fault-tolerance testing through network fault injection via Toxiproxy. The results demonstrate the superiority of the Saga and TCC patterns regarding scalability and throughput compared to the blocking 2PC protocol, providing clear guidelines for selecting the optimal transaction model in distributed systems.*

Keywords: *distributed transactions, microservices, 2PC, TCC, Saga.*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Владимир Димитриески, ванр. проф.

1. УВОД

Развој савремених софтверских система донио је широку примјену дистрибуираних микросервисних архитектура као алтернативну опцију монолитном приступу. У оваквим системима, функционалности су подијељене на мање, независне јединице које међусобно комуницирају путем *HTTP/REST* или асинхроних порука [1]. Иако овакав приступ доноси предности у погледу скалабилности и флексибилности, он суштински мијења начин на који се управља подацима. Када се операције протежу кроз више сервиса од којих сваки управља сопственом базом података, традиционалне *Atomicity, Consistency, Isolation, Durability (ACID)* трансакције нису примјењиве преко тих граница. Због тога је потребна примјена протокола за управљање дистрибуираним трансакцијама који балансирају између конзистентности, поузданости и перформанси.

У овом раду анализирана су три приступа управљању дистрибуираним трансакцијама: двофазно потврђивање глобалне трансакције (енгл. *Two-Phase Commit – 2PC*), *Try-Confirm-Cancel* (*TCC*) и *Saga*. Циљ рада је извршити упоредну анализу ова три протокола кроз практичну имплементацију у окружењу *Quarkus* [3]. Анализа обухвата мјерење кључних параметара система у контролисаним условима симулираних оптерећења и отказа, са посебним освртом на вријеме одзива, пропусну моћ и очување интегритета података. На тај начин, рад тежи да пружи емпиријске податке о томе како се различити протоколи понашају у погледу перформанси и конзистентности у микросервисним системима.

2. ПРЕГЛЕД ТРАНСАКЦИЈСКИХ ПРОТОКОЛА И ИМПЛЕМЕНТАЦИЈЕ

У оквиру истраживања имплементирана су три тестна дистрибуирана система заснована на микросервисној архитектури, при чему сваки користи различите приступе управљању трансакцијама. Системи су реализовани у софтверском екосистему *Java* коришћењем радног окружења *Quarkus*.

2.1. Протокол двофазног потврђивања (енгл. *Two-phase commit 2PC*)

Протокол двофазног потврђивања представља централизовани атомски механизам који осигурава строгу конзистентност кроз двије фазе: гласање и извршавање [1]. У имплементираном моделу користи се трансакциони координатор заснован на компоненти *Narayana JTA*. Главна карактеристика овог приступа јесте закључавање ресурса на нивоу подтрансакција све док координатор не донесе коначну одлуку. Иако спречава појаву „прљавих читања", ово закључавање директно утиче на пропусност система и повећава ризик од мртве петље (енгл. *deadlock*) у условима високог оптерећења.

2.2. *Try-Confirm-Cancel* (*TCC*)

Образац *TCC* је апликативни трансакциони образац намијењен за системе са високим захтјевима по питању перформанси, гдје се изолација постиже резервацијом ресурса умјесто условним закључавањем на нивоу базе података [4]. Имплементација се састоји из три експлицитне фазе

Фаза *Try* провјерава доступност ресурса и врши се њихова привремена резервација (нпр. уписивањем у посебно стање или табелу резервација).

Ако су сви микросервиси успјешно извршили фазу *Try,* Фаза *Confirm* покреће коначну потврду и ресурси се трајно заузимају.

У случају отказа Фаза *Cancel* извршава експлицитно отказивање било ког учесника чиме се резервисани ресурси ослобађају.

2.3. *Saga*

Образац *Saga* [2] редефинише глобалну трансакцију као низ локалних трансакција које се извршавају секвенцијално. Сваки корак одмах трајно уписује измјене у своју локалну базу података, чиме се у потпуности елиминише закључавање. Уколико нека од локалних трансакција откаже, покрећу се компензационе трансакције (енгл. *compensating transactions*) у обрнутом редослиједу како би поништио претходно успјешне кораке и вратио систем у конзистентно стање.

У раду је имплементиран шаблон оркестратор (енгл. *orchestrator)*. Централна компонента (оркестратор) управља током извршавања и експлицитно позива наредне сервисе или покреће компензације у случају грешке. Комуникација између оркестратора и сервиса дешава се преко платформе за асинхроно слање порука попут платформе *Apache Kafka.* Овај модел прихвата концепт конвергентне конзистентности (енгл. *eventual consistency*), што значи да систем током извршавања може бити у привремено неусклађеном стању.

2.4. Верификација квалитета кода

Прије приступања експерименту мјерења перформанси, спроведено је мутационо тестирање помоћу алата *Pitest*. Циљ овог корака био је верификација ригорозности постављених интеграционих тестова убризгавањем вјештачких отказа у код током рада апликације. Постигнути високи индекс "уклоњених мутација" (енгл. *mutation score*) је потврдио да је логика покривености тестова исправна, те да су имплементирани дистрибуирани протоколи спремни за валидно експериментално испитивање.

3. ПОСТАВКА ЕКСПЕРИМЕНТА

Како би се извршила објективна квантитативна упоредна анализа имплементираних протокола, формирано је јединствено експериментално окружење унутар контролисаних хардверских и софтверских оквира. Сва три приступа (*2PC, TCC* и *Saga*) су тестирана под идентичним условима симулираног оптерећења и мрежних аномалија.

3.1. Експериментално окружење

Све компоненте архитектуре покренуте су у контејнеризованом окружењу помоћу алата *Docker* и *Docker Compose* на рачунару са процесором *AMD Ryzen* 7 (8 физичких језгара, 16 нити) и 16 *GB RAM* меморије, док је прикупљање података покренуто на другом рачунару, чиме је издвојено оптерећење прикупљања података за експеримент од саме покренуте инстанце апликације. За перзистенцију података сваког појединачног микросервиса су коришћене независне инстанце базе података *PostgreSQL*.

3.2. Тестирање перформанси

За генерисање виртуелног оптерећења и симулацију реалних корисничких захтјева коришћен је алат отвореног кода *k6*. Сценарио тестирања обухватао је постепено подизање броја истовремених виртуелних корисника (енгл. *Virtual Users – VUs*) са почетних 10 на максималних 150 у врху оптерећења, током дефинисаног временског интервала.

Примарне метрике које су праћене и биљежене током извршавања *k6* скрипти обухватају: укупан број успјешних и неуспјешних трансакција у секунди (енгл. *Throughput*), крајње кашњење извршавања трансакције (енгл. *End-to-End Latency*), укључујући средњу вредност, као и 90. и 95. перцентил и проценат успјешности *HTTP* одговора (успјешне трансакције са статусом 200 *OK* насупрот грешкама 4xx и 5xx).

3.3. Убризгавање грешака

Да би се испитала отпорност на отказе и способност очувања исправности података у кризним сценаријима, између микросервиса и база података је интегрисан алат *Toxiproxy*. Спроведена су три карактеристична сценарија убризгавања мрежних аномалија (енгл. *toxic scenarios*).

Вјештачко кашњење *(*енгл. *Latency Toxic)* подразумијева увођење симулираног мрежног кашњења од 2000 миилсекунди на комуникационим каналима ка бази или између сервиса, чиме се тестира понашање тајмаута (енгл. *timeout*) приступа.

Прекид везе *(*енгл. *Timeout/Close Toxic)* обухвата нагли и потпуни прекид активних *TCP* конекција у кључним

фазама трансакције (нпр. након фазе гласања у *2PC* или током извршавања средњег корака у *Saga*).

Ограничење пропусног опсега *(*енгл. *Bandwidth Toxic)* подразумијева редукцију брзине преноса података на мрежи како би се симулирала деградација инфраструктуре.

Кроз ове мрежне манипулације је директно верификовано да ли приступи успјешно покрећу механизме компензације, операције отказивања или логику враћања стања ради спријечавања појаве неконзистентних записа у базама података.

У Табели 1 се могу видјети резултати мутационих тестова.

Сервис	Покривеност линија кода	Покривеност мутација	Снага тестова
2PC	90% (288/319)	78% (87/111)	96% (87/91)
Saga - inventory	95% (251/265)	95% (74/78)	100% (74/74)
Saga – order	100% (152/152)	97% (31/32)	97% (31/32)
Saga – payment	96% (208/217)	97% (57/59)	98% (57/58)
TCC – inventory	95% (253/265)	96% (77/80)	100% (77/77)
TCC – order	99% (151/152)	97% (28/29)	97% (28/29)
TCC - payment	100% (205/205)	100% (53/53)	100% (53/53)

Табела 1: Приказ резултата мутационих тестова

4. РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗА ПЕРФОРМАНСИ

У овом поглављу приказани су квантитативни резултати тестирања перформанси имплементираних трансакционих модела под оптерећењем од 150 истовремених виртуелних корисника (*VUs*). Кључни параметар поређења обухвата средњу вриједност кашњења (енгл. *end-to-end latency*) која говори колико су трансакције трајале у просјеку.

У Табели 2 се могу видјети добијене перформансе сва три приступа у милисекундама. Експеримент је покренут по три пута за сваки приступ, а у табели су издвојене итерације са најбољим перформансама за сваки приступ.

Приступ	Просјечно	Медијана	*p(90)*	p(95)	Максимално
2PC	1178,40	531	2543	2571	58247
TCC	1069,96	542	2069	2563	10626
Saga	819,13	522	1547	2045	5501

Табела 2: Перформансе трансакција

4.1. Анализа пропусне моћи и кашњења

На основу резултата, образац *Saga* остварује најбоље перформансе у свим тестираним сценаријима. Током три извршавања теста је остварено између 39929 и 42689 трансакција, што представља највећи број обрађених трансакција међу свим тестираним приступима, са средњим кашњењем од 819,13 милисекунди. Овакав резултат је директна посљедица асинхроне природе овог обрасца и одсуства било каквог дуготрајног закључавања дистрибуираних ресурса – свака локална трансакција одмах потврђује своје измјене на нивоу локалне базе података.

Образац *TCC* је кроз три инстанце експеримента одрадио између 34225 и 36354 трансакције са просјечним кашњењем од 1069,96 милисекунди које је умјерено веће у односу на образац *Saga*. Разлог лежи у чињеници да образац *TCC* захтијева експлицитну двофазну комуникацију на апликативном нивоу (фаза *Try* праћена фазом *Confirm*). Ипак, задржавањем високе успјешности од 100%, образац *TCC* се потврђује као одличан избор за системе који захтијевају високу пропусност уз обавезну резервацију ресурса.

4.2. Архитектонски утицај на деградацију протокола *2PC*

Протокол двофазног потврђивања (*2PC*) је показао најслабије резултате. Током три извршавања остварено је између 25016 и 26801 трансакција, што је најмањи број обрађених трансакција од три тестирана приступа, док средње кашњење износи 1178,40 милисекунди. Поред тога, протокол *2PC* је једини приступ код кога је забиљежен пад успјешности извршавања трансакција на између 98,9% и 99,7%, док су остали имали 100,0% успјешно изврешних трансакција.

Главни узрок оваквог понашања јесте песимистичко закључавање ресурса (енгл. *pessimistic locking*) које намеће *JTA* трансакциони координатор. Како сви учесници морају да држе закључане редове у базама података од почетка фазе гласања па све до коначног потврђивања, мрежни низови захтјева почињу брзо да се акумулирају. Ово доводи до засићења базе података (исцрпљивање *Docker* контејнерских ресурса и базена конекција), као и појаве трансакционих тајмаута, што директно резултује падом перформанси и генерисањем грешака.

5. АНАЛИЗА ОТПОРНОСТИ НА ГРЕШКЕ

Поред перформанси под високим оптерећењем, кључан аспект евалуације протокола јесте њихова способност очувања конзистентности података у условима инфраструктурних отказа. Понашање система при убризгавању мрежних аномалија анализирано је кроз три карактеристична сценарија користећи алат *Toxiproxy*.

5.1. Утицај вјештачког кашњења

Увођење мрежног кашњења од 2000 милисекунди на каналима комуникације је показало суштинске архитектонске разлике у управљању тајмаутима.

Код протокола *2PC* песимистичко закључавање, комбиновано са кашњењем, довело је до брзог засићења базена конекција. Када би трансакција прекорачила дефинисани тајмаут, *JTA* координатор би успјешно покретао операцију *rollback*, спријечавајући неконзистентност, док су перформансе система биле слабије.

Образац *TCC* При појави кашњења у фази *Try*, апликативни тајмаут је прекидао извршавање и активирао фазу *Cancel*. Сви резервисани ресурси су успјешно ослобођени, чиме је очувана исправност.

Код обрасца *Saga,* будући да кораци одмах уписују промене, рад се наставио све до истека тајмаута оркестратора. У случају прекорачења, оркестратор је успјешно иницирао асинхроне компензационе трансакције.

5.2. Ефекти прекида везе

Нагли прекид активних *TCP* конекција је представљао највећи изазов за исправност система.

Обрасци *Saga* и *TCC* показала су изузетну отпорност захваљујући имплементираним механизмима опоравка и идемпотентности *HTTP* захтјева. Након успостављања везе, *Saga* оркестратор је успјешно довршио компензације, док је *TCC* координатор успјешно извршио фазе *Cancel*, враћајући систем у конзистентно стање.

Највећа рањивост протокола *2PC* уочена је у сценарију отказа везе након фазе гласања, а прије фазе потврде. Ако трансакциони координатор изгуби везу са микросервисом у овом критичном прозору, ресурси у бази података остају закључани све до ручне интервенције или истека дубоких системских тајмаута базе. Ово потврђује теоријски недостатак протокола *2PC* као блокирајућег протокола.

5.3. Збирна евалуација коректности

Спроведени *Fault-Injection* експерименти су потврдили да апликативни трансакциони обрасци (*TCC* и *Saga*), уз правилну имплементацију идемпотентности, пружају знатно већу флексибилност и доступност у дистрибуираним срединама склоне грешкама. Док протокол *2PC* фаворизује строгу конзистентност по цијену блокирања цијелог система, образац *Saga* успјешно примјењује концепт конвергентне конзистентности, чинећи архитектуру отпорнијом на парцијалне мрежне отказе. Ово је прије свега посљедица структуралне рањивости протокола *2PC* — отказ централизованог координатора након фазе гласања оставља све учеснике блокираним на неодређено вријеме, што директно угрожава доступност система у цјелини.

6. ЗАКЉУЧАК И ПРЕПОРУКЕ

На основу спроведене емпиријске евалуације три кључна концепта за управљање дистрибуираним трансакцијама, дефинисане су јасне препоруке за развој софтвера у микросервисним архитектурама.

Образац *Saga* се препоручује за системе високе доступности и велике пропусне моћи (нпр. е-трговина, стриминг платформе) гдје је конвергентна конзистентност прихватљива. Елиминација закључавања омогућава линеарну скалабилност, али захтијева пажљиво пројектовање идемпотентних компензација.

Образац *TCC* је оптималан за домене гдје је неопходна моментална апликативна резервација ресурса (нпр. резервација авио-карата или хотелских соба), али гдје се жели избјећи песимистичко блокирање базе података какво намеће протокол *2PC*. Образац *TCC* нуди баланс између добрих перформанси и заштите од прекорачења капацитета.

Протокол *2PC* треба ограничити искључиво системе са ниским степеном конкурентности гдје је строга конзистентност апсолутни захтјев (нпр. основни банкарски трансфери). У дистрибуираним системима већег обима, његова блокирајућа природа представља озбиљан ризик по стабилност система.

Приликом тумачења резултата експеримента треба узети у обзир неколико ограничења: окружење тестирања, иако распоређено на два умрежена рачунара, није еквивалентно продукцијском услед дијељених системских ресурса међу свим сервисима, што значи да оптерећење једног сервиса може утицати на перформансе осталих; симулација отказа путем алата *Toxiproxy* је извршена кроз контролисане, унапријед дефинисане сценарије, а не кроз насумичне или истовремене вишеструке отказе карактеристичне за стварна производна окружења; и коначно, имплементације приступа *Saga, 2PC* и *TCC*, иако засноване на теоријским поставкама из литературе, представљају само једну од могућих конкретизација сваког приступа, па добијене резултате не треба тумачити као апсолутну и коначну мјеру перформанси самих приступа, већ као показатељ понашања конкретних имплементација у датим условима тестирања.

7. ЛИТЕРАТУРА

[1] C. Richardson, *Microservices Patterns: With Examples in Java*. Shelter Island, NY, USA: Manning Publications, 2018.

[2] K. Dürr, R. Lichtenthäler and G. Wirtz, "An Evaluation of Saga Pattern Implementation Technologies," in Proceedings of the 13th European Workshop on Services and their Composition (ZEUS 2021), CEUR Workshop Proceedings, vol. 2839, pp. 74–82, 2021.

[3] Quarkus, "Quarkus Guides – Transactions, Kafka and REST," 2025. [Online]. Available: https://quarkus.io/guides/

[4] Apache Seata, "TCC Mode Documentation," 2024. [Online]. Available: https://seata.apache.org/docs/user/mode/tcc/

Кратка биографија:



Иван Ђукановић је рођен у Подгорици 7. новембра 2001. године. Након завршених основних студија, уписао се на мастер академске студије на Факултету техничких наука, студијски програм Софтверско инжењерство и информационе технологије.
Контакт:
ivan.djukanovic07@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 4.4
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36BE49Ostovic

Паметна аналитика и анализа потрошње електричне енергије

Smart Analytics and Analysis of Electrical Energy Consumption

Марија Остовић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ПРИМЕЊЕНО СОФТВЕРСКО ИНЖЕЊЕРСТВО

Кратак садржај – *Рад истражује како се савремене аналитичке методе могу искористити за праћење временских серија у енергетици. У истраживању су коришћени реални подаци, као и контролисани синтетички скуп у који су намерно убачене грешке ради тестирања алгоритама. Линеарна регресија је примењена за предвиђање потрошње у време највећег дневног шпица у 14 часова, док је autoencoder неуронска мрежа искоришћена за откривање дана који одступају од уобичајених профила. Граница постављена на 95. перцентил грешке реконструкције успешно је издвојила дане са највећим променама, а PCA визуелизација је графички потврдила јасно раздвајање нормалног понашања од аномалија. Повезивање ова два приступа показало се ефикасним за брзо препознавање необичних образаца, што поставља добру основу за боље разумевање података и паметније управљање ресурсима у мрежи.*

Кључне речи: *паметна аналитика, потрошња електричне енергије, линеарна регресија, autoencoder*

Abstract – *The paper explores how modern analytical methods can be used to monitor time-series data in the energy sector. The research utilizes real-world datasets alongside a controlled synthetic dataset with intentionally injected errors to test the algorithms. Linear regression is applied to forecast consumption during the peak hour at 2 PM, while an autoencoder neural network is used to detect days that deviate from typical profiles. A threshold set at the 95th percentile of the reconstruction error successfully isolated the days with the most significant shifts, and PCA visualization graphically confirmed a clear separation between normal behavior and anomalies. Combining these two approaches proved effective for rapid recognition of unusual patterns, providing a solid foundation for a better understanding of data and smarter resource management within the grid.*

Keywords: *smart analytics, electricity consumption, linear regression, autoencoder*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био проф. др Срђан Вукмировић.

1. УВОД

Савремени електроенергетски системи се под утицајем масовне дигитализације и ширења концепта паметних мрежа *(Smart Grid)* трансформишу у комплексна дигитална окружења. Интеграција паметних бројила и *IoT* сензора омогућила је континуирано прикупљање података о потрошњи електричне енергије у реалном времену. Ови подаци више не представљају само суву историјску метрику, већ динамичан запис корисничких навика, мрежних оптерећења и сигурносних индикатора комплетне инфраструктуре [1], [2].

Изазов у управљању оваквим ресурсима лежи у самој природи података – потрошња струје је временска серија подложна снажним сезонским, месечним и сатним флуктуацијама. Да би се ове комплексне законитости и ритмови разумели, визуелизација служи као први, есенцијални корак који апстрактне вредности претвара у препознатљиве обрасце и открива како систем „дише" током године [3]. Међутим, да бисмо доносили боље одлуке и реаговали пре него што дође до преоптерећења, морамо искористити савремене алате за аутоматску обраду података.

Овај рад се фокусира на практичну примену паметне аналитике кроз два приступа. Први део истраживања посвећен је предвиђању вршног оптерећења, где смо помоћу линеарне регресије покушали да предвидимо потрошњу у најкритичнијем делу дана – у 14 часова. Други део рада бави се сигурношћу система кроз имплементацију autoencoder неуронске мреже, која нам помаже да аутоматски откријемо необичне промене у потрошњи које могу указивати на проблем. Повезивање ова два приступа пружа поуздан оквир за паметније управљање енергетским системима.

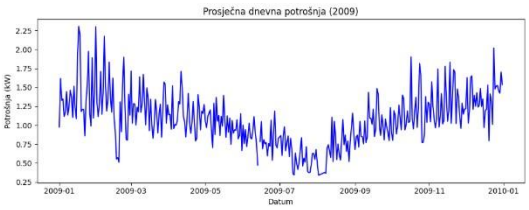
2. ПАМЕТНА АНАЛИТИКА У ЕНЕРГЕТСКИМ СИСТЕМИМА

Прелазак са традиционалне електроенергетске мреже на паметну мрежу *(Smart Grid)* заснива се на увођењу нових начина за праћење и обраду података. Главна разлика је у томе што паметна мрежа омогућава двосмерну комуникацију између самог система и потрошача. Преко паметних бројила и сензора, подаци о потрошњи струје пристижу непрекидно. Ова велика количина информација стиже огромном брзином из различитих извора, што ствара потпуно

нове захтеве за анализу у односу на некадашње ручно бележење потрошње [1], [2].
Да би се сви ови прикупљени бројеви практично искористили, паметна аналитика служи као веза између сирових мерења и доношења конкретних одлука. Први корак је припрема података, чиме се издваја користан сигнал, а уклањају грешке у мерењима које могу настати у преносу. Пошто рад са милионима записа захтева велику рачунарску снагу, данас је *Cloud computing* постао незаобилазна технологија у овом процесу. Он омогућава да се велика количина података сигурно чува и обрађује на удаљеним серверима у облаку, без потребе за куповином прескупе локалне опреме [5], [6].
Овакав приступ мења начин рада – анализу потрошње померамо са обичног посматрања прошлости на предвиђање и брзо проналажење неправилности у систему. Када рачунар препозна како се потрошња мења током годишњих доба, како на њу утиче промена температуре или када се јављају највећи дневни шпицеви, добијамо вредне информације. То је основа за развој енергетски ефикасних паметних зграда и градова, где се енергијом управља паметније и економичније.

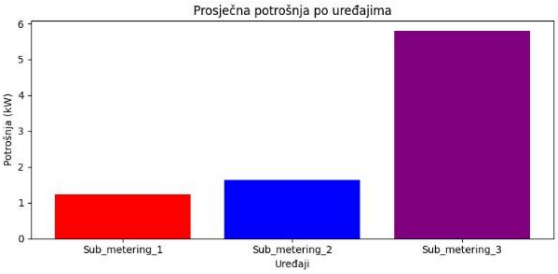
3. ПРАКТИЧНА АНАЛИЗА И ВИЗУЕЛИЗАЦИЈА ВРЕМЕНСКИХ СЕРИЈА

Након почетног учитавања реалног скупа података помоћу библиотеке *Pandas,* извршено је спајање датумских и сатних уноса у континуирану временску серију. Припрема је обухватила идентификацију и уклањање некоректних уноса, чиме је обезбеђена висока поузданост каснијих резултата. На основу очишћених података извршено је груписање и статистичко сумирање на три временска нивоа: сатном, дневном и месечном.
Праћење потрошње на дневном нивоу омогућава уочавање прелаза између краткорочних флуктуација унутар једног дана и дугорочних сезонских трендова. Иако се у раду детаљно посматрају и преостала два временска нивоа, њихови резултати су усклађени са општом динамиком. Анализа на сатном нивоу открива унутрашњи дневни ритам са израженим минимумом током касних ноћних часова и критичним шпицевима оптерећења у вечерњем периоду, када је активност у домаћинству највећа. Са друге стране, месечни ниво агрегације јасно дефинише макроекономске и климатске циклусе на нивоу године, разграничавајући прелазне периоде од екстремних зимских месеци [3].



Слика 1. Дневна потрошња електричне енергије

За потребе овог рада, као најсвеобухватнији пресек који успешно повезује краткорочне промене и дугорочне циклусе, одабран је приказ на дневном нивоу. На Слици 1 приказана је просечна дневна потрошња електричне енергије кроз посматрани вишегодишњи период.
Визуелизација јасно открива да енергетски систем има цикличну динамику која прати промену годишњих доба. Најнижи нивои активности бележе се средином године, током летњих месеци, док се нагли пораст оптерећења и изражени скокови јављају крајем и почетком године. Овакав тренд директно одсликава промену животних навика корисника услед хладног времена, када долази до интензивније употребе грејних тела и расвете.
Поред чисто временске анализе, за боље разумевање структуре оптерећења извршена је разградња укупне снаге на специфичне категорије потрошача унутар објекта. Овај приступ омогућава да се идентификује који уређаји имају највећи појединачни утицај на систем. На Слици 2 приказана је просечна потрошња електричне енергије по групама уређаја унутар домаћинства кроз три издвојена подбројила.



Слика 2. Потрошња електричне енергије по групама уређаја

Анализа профила са Слике 2 показује неједнаку дистрибуцију потрошње унутар објекта. Прва група уређаја, која обухвата кухињске апарате, карактерише се повременим и краткотрајним вршним оптерећењима. Друга група, везана за термотехничке системе, показује оштру зависност од сезонских услова. Насупрот њима, трећа група, која покрива расвету и кућну електронику, генерише континуиран и стабилан базни ниво потрошње током целе године. Лоцирањем највећих појединачних потрошача на овај начин ствара се основа за доношење циљаних мера енергетске ефикасности и оптимизацију рада мреже.

4. ПРИМЕНА АНАЛИТИЧКИХ МОДЕЛА И ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА

Након припреме података, потрошњу смо анализирали кроз два различита модела: предвиђање потрошње у шпицу помоћу линеарне регресије и откривање грешака и необичних дана помоћу аутоенкодера.

4.1. Линеарна регресија за предвиђање потрошње у шпицу

Линеарна регресија је искоришћена као једноставан модел где је циљ био да предвидимо укупну активну

снагу *(Global_active_power)* у критичном дневног шпицу у 14 часова, користећи сате *(Hour)* као главни параметар из библиотеке *scikit-learn*. Модел повезује доба дана и потрошњу струје, чиме нам показује општи смер кретања потрошње током тог времена. Да бисмо проверили колико је модел тачан, израчунали смо стандардне статистичке грешке: средња апсолутна грешка износи *MAE* = 0.831, средња квадратна грешка је *MSE* = 1.234, док је корен средње квадратне грешке *RMSE* = 1.111. Ови бројеви нам показују да модел успешно прати основни дневни ритам потрошње. Са друге стране, стварни подаци у неким данима доста скачу, због чега долази до одступања од регресионе линије. То се дешава зато што овај модел користи само један улазни податак (сате), док у стварном животу потрошња зависи од много других ствари, као што су температура, рутинске навике или број укључених уређаја. Ипак, линеарна регресија је супер јер се резултати брзо добијају и лако тумаче, па нам служи као одлична основа за поређење са сложенијим алгоритмима.

4.2. Архитектура и тренинг аутоенкодера за детекцију аномалија

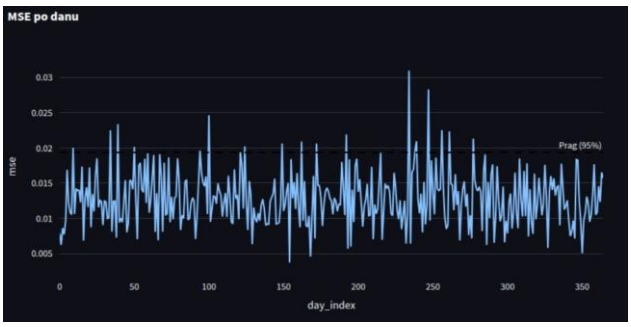
За проналажење скривених проблема и чудних промена у потрошњи, искористили смо аутоенкодер – врсту неуронске мреже која сама учи шта је нормално понашање [5]. Модел смо тестирали на синтетичким подацима који верно приказују уобичајен дан у домаћинству (растућу потрошњу ујутру, стабилан дан и велики скок увече), али смо у њих намерно убацили аномалије попут наглих скокова или падова снаге [4]. Сваки податак који убацимо у мрежу представља један цео дан са 24 сатне вредности.

Осмислили смо потпуно симетричну мрежу са распоредом слојева 24–12–3–12–24. Први слој прихвата 24 сатне вредности, затим средњи слој са 12 неурона смањује податке, док се у самом центру налази латентни простор од само 3 неурона који чува најважнију, сажету слику целог дана. Након тога, други део мреже (декодер) ради супротно – шири податке преко 12 неурона назад до излазних 24, покушавајући да поново нацрта оригинални дан.

У скривеним слојевима користили смо *ReLU* активациону функцију која помаже мрежи да боље учи, а током тренинга смо пратили средњу квадратну грешку *(MSE)*. Кроз више понављања, мрежа је научила да обичне дане нацрта скоро савршено, док код чудних и аномалних дана прави велику грешку у реконструкцији, што нам је главни знак да нешто није у реду [5].

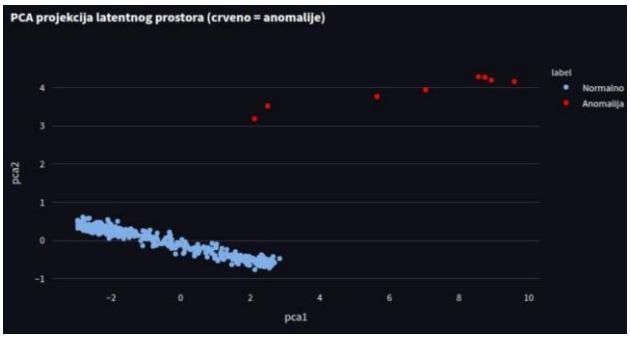
4.3. Грешка реконструкције и PCA визуелизација

Разлика између оригиналног дана и оног који је мрежа покушала да нацрта зове се грешка реконструкције *(reconstruction error)*. Да бисмо аутоматски препознали необичне дане, границу смо поставили на 95. перцентил укупне грешке. То значи да смо издвојили 5% дана који имају највеће математичко одступање од нормале [4]. Све вредности ове грешке заједно са постављеном границом приказане су на Слици 3.



Слика 3. Reconstruction error и праг за детекцију аномалија

Да бисмо проверили како мрежа „размишља", искористили смо *PCA* методу која податке из латентног простора претвара у обичан дводимензионални график [3]. Тај просторни приказ дана можете видети на Слици 4.



Слика 4. PCA визуелизација латентног простора

Положај тачака на Слици 4 јасно показује колико је овај модел паметан: нормални дани се држе заједно и праве велику густу групу у средини, док су аномални дани разбацани далеко изван те групе као изоловане тачке.

Ипак, модел има неколико ограничења. Мрежа нам јавља да дан одступа од нормале, али не може сама да нам каже зашто се то десило (да ли је у питању квар, преоптерећење мреже или је неко само укључио више уређаја одједном). Такође, ако се неки дан дешава ретко, а потпуно је исправан, мрежа га може лажно означити као грешку ако га пре тога није видела током тренинга. Упркос томе, ова комбинација рачунања грешке и графичког приказа је одличан систем за брзо откривање чудног понашања мреже у реалном времену.

5. ЗАКЉУЧАК

Праћење потрошње електричне енергије данас има много већи значај од простог записивања бројева са бројила. Овај рад је показао да кроз паметну анализу података можемо сазнати много тога о навикама корисника, оптерећењу мреже и потенцијалним проблемима. На тај начин добијамо корисне информације које нам помажу да боље и сигурније управљамо енергијом.

У раду смо успјешно повезали неколико различитих корака. Прво смо кроз графиконе уочили како се потрошња мења кроз годишња доба и који уређаји у кући троше највише струје. Затим смо користили

линеарну регресију као једноставан алат који нам је брзо дао процену потрошње у вријеме највећег дневног шпица у 14 часова. На крају, главни део рада посвећен је моделу аутоенкодера који је сам научио како изгледа један нормалан дан, па је успјешно пронашао и издвојио оне дане у којима се потрошња понашала чудно и нетипично, што смо и графички потврдили.

Суштина ових резултата је у томе што нам овакви модели омогућавају да пређемо са пасивног посматрања на брзо деловање. То значи да кризне ситуације, кварове или преоптерећења мреже можемо препознати и ријешити на вријеме, прије него што настане стварна штета. Овај приступ поставља добру основу за развој паметних зграда и градова, а у будућности систем вреди проширити и додатним подацима, као што је спољашња температура.

6. ЛИТЕРАТУРА

[1] C. W. Gellings, The Smart Grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response. Lilburn, GA, USA: Fairmont Press, 2009.

[2] M. Amin and B. F. Wollenberg, “Toward a Smart Grid: Power Delivery for the 21st Century,” IEEE Power and Energy Magazine, vol. 3, no. 5, pp. 34–41, Sep.–Oct. 2005.

[3] J. Han, M. Kamber, and J. Pei, Data Mining: Concepts and Techniques, 3rd ed. Waltham, MA, USA: Morgan Kaufmann, 2012.

[4] V. Chandola, A. Banerjee, and V. Kumar, “Anomaly Detection: A Survey,” ACM Computing Surveys, vol. 41, no. 3, Article 15, pp. 1–58, 2009.

[5] I. Goodfellow, Y. Bengio, and A. Courville, Deep Learning. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2016.

[6] Kaggle, “Individual Household Electric Power Consumption Dataset.” Accessed: 2026. [Online]. Available: https://www.kaggle.com/datasets/uciml/electric-power-consumption-data-set

Кратка биографија:

Марија Остовић рођена је у Фочи 2001. год. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Електротехнике и рачунарства – Примењено софтверско инжењерство одбранила је 2026.год.

Контакт:
marijaostovic31@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 621.38:620.9
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36BE50Vasic

Нумерички поступак за одређивање перформанси асинхроних машина

Numerical Method for Evaluating the Performance of Induction Machines

Драгомир Васић, Дејан Јеркан, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОНИКА И ТЕЛЕКОМУНИКАЦИЈЕ

Кратак садржај – *У раду је анализиран нумерички поступак за одређивање перформанси асинхроних машина на основу методе коначних елемената. Рад показује понашање карактеристичних величина за различите радне режиме дате машине.*

Кључне речи: *асинхроне машине, метода коначних елемената, радни режими асинхроне машине*

Abstract – *The paper presents a numerical approach for evaluating the performance of induction machines using the finite element method (FEM). The behavior of the machine's characteristic parameters is examined under various operating conditions.*

Keywords: *induction machines, finite element method (FEM), operating modes of an induction machine*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Дејан Јеркан, ванр. проф.

1. УВОД

Асинхроне машине (индукционе машине) су врста наизменичних машина које се најчешће користе као мотори. Принцип рада се огледа у томе да се довођењем напона на статорски намотај ствара магнетски флукс због тока струје кроз статорски намотај. Магнетски флукс статора пресеца краткоспојене завојнице ротора. По Фарадајевом закону електромагнетске индукције настаје струја.
Када кроз ротор тече струја, у њему се ствара нови магнетски флукс ротора. Због заостајања магнетског тока ротора за магнетским током статора, ротор никада не може достићи брзину ротирајућег магнетског поља, односно синхрону брзину. Значај асинхроних машина се огледа у ефикасности, па се на основу тога највише користе у индустрији за различите намене [1].
У овом раду је извршена анализа специфичне асинхроне машине у различитим режимима рада. Анализа је спроведена применом методе коначних елемената у софтверу. Циљ рада је био да се анализирају различити режими рада и покажу одзиви величина који описују асинхрону машину.

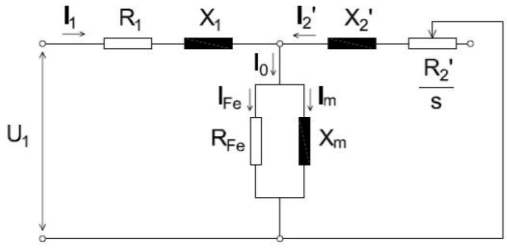
2. КАРАКТЕРИСТИКЕ И ЕКВИВАЛЕНТНА ШЕМА АСИНХРОНЕ МАШИНЕ

Асинхрона машина која се разматра у овом раду и њене карактеристике су представљене у табели 1.

Табела 1. Подаци карактеристичне машине [2]

Номинална снага	3100	[kW]
Номинални напон	400	[V]
Номинална струја	6046	[A]
Фреквенција	50	[Hz]
Брзина обртања	297	[o/min]
Сачинилац снаге	0,77	
Ефикасност	0,959	
Номинални момент	97706	[Nm]

Ради се о асинхроном генератору који је тестиран као мотор, па се подаци у табели 1 односе на моторски режим рада. Изведба статорских намотаја ове асинхроне машине је у звезди (Y). Степен заштите кућишта је IP 23 што значи да је машина заштићена од чврстих тела већих од 12,5 mm и заштита од воде која пада под углом од 60 ° од вертикале, није водоотпорна ако се налази вани, тада мора имати додатну заштиту.
Заштита термичке кутије је IP 54 што представља заштиту од прашине и прскања воде. Изолациона класа је H што значи да је максимална дозвољена температура 180 ℃, док је температурна класа машине B, тј. 80 °K изнад температуре амбијента [2].
Еквивалентна шема асинхроне машине се може видети на слици 1.



Слика 1. Еквивалентна шема асинхроних машина [1]

Струја статорског намотаја (I_1) одређена је наметнутим напоном статора (U_1) , омском отпорношћу статорског намотаја (R_1) , реактансом расипања статорског намотаја (X_1) и индукованом контра електромоторном силом. Пролазак струје кроз статорски намотај праћен је стварањем флукса, који се затвара око самог намотаја (расипни флукс) и који се затвара кроз ваздушни зазор и ротор (заједнички

флукс). Флукс се спреже са роторским намотајем и индукује контра електромоторну силу, јер она држи равнотежу са наметнутим напоном. Роторска страна се своди на статорску, јер су електрична кола статора и ротора галвански одвојена.

Омске отпорности (R_1 и R_2') представљају елементе еквивалентне шеме на којим се дисипира енергија, односно то су Џулови губици машине. Може се уочити да роторска отпорност зависи од клизања, па када је износ клизања еквивалентан јединици, онда се губици своде само на губитке у бакру (P_{Cu}). Међутим, када то није случај онда поред губитака у бакру (P_{Cu}), енергија прелази и у механичку снагу. Реактансе (X_1 и X_2') су елементи еквивалентне шеме који повезују утицај магнетског поља и индуктивности, њихова енергија се не троши за разлику од отпорних елемената, него се привремено складишти.

Реактанса и струја магнећења (X_m и I_m) описују реактивну енергију потребну за магнећење магнетског кола. Флуксеви који се расипају само око једног намотаја су описани реактансама расипања. Заједнички флукс, претходно поменут, је резултат заједничког деловања струја статора и ротора, па његово деловање обухвата ваздушни зазор и узрокован је струјом магнећења.

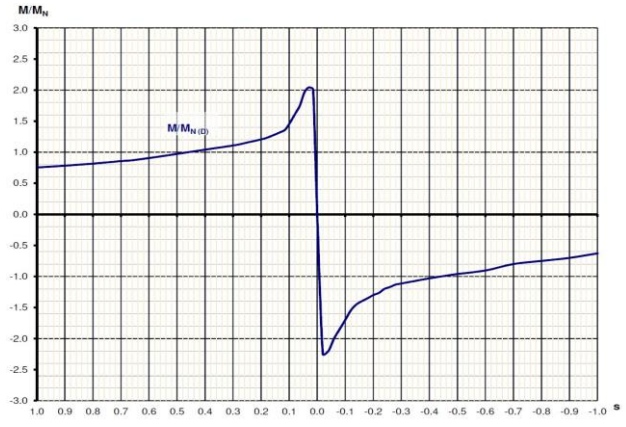
Губици у гвожђу (P_{Fe}) се еквивалентирају омским отпором R_{Fe} у грани магнећења, овај елемент еквивалентне шеме моделује губитке у језгру који настају услед вртложних струја и хистерезиса [1].

3. МОМЕНТНА КАРАКТЕРИСТИКА АСИНХРОНЕ МАШИНЕ

Клизање машине нам даје карактеристична подручја рада асинхроне машине. Постоје три карактеристична подручја с обзиром на вредност клизања:

- Моторско подручје рада ($1 \geq s \geq 0$) , енергија се узима из мреже,
- Генераторско подручје рада ($s < 0$), енергија се враћа у мрежу,
- Режим кочнице ($s > 1$).

Моментна карактеристика машине која је у разматрању налази се на слици 2.



Слика 2. Моментна карактеристика асинхроне машине [2]

Формуле за прорачун моментних величина, номиналног, превалног клизања и Хопкинсовог коефицијента су [1]:

$$M_n = \frac{3}{2}\frac{p\,U^2}{\pi f_s}\cdot\frac{\frac{R_r'}{s_n}}{\left(R_s+\sigma_1\frac{R_r'}{s_n}\right)^2+\left(X_{ys}+\sigma_1 X_{yrk}'\right)^2} \quad (1)$$

$$M_{pol} = \frac{3}{2}\frac{p\,U^2}{\pi f_s}\cdot\frac{\frac{R_r'}{s_{pol}}}{\left(R_s+\sigma_1\frac{R_r'}{s_{pol}}\right)^2+\left(X_{ys}+\sigma_1 X_{yrk}'\right)^2} \quad (2)$$

$$M_{pr} = \frac{3}{2}\frac{p\,U^2}{\pi f_s}\cdot\frac{\frac{R_r'}{s_{pr}}}{\left(\left(R_s+\sigma_1\frac{R_r'}{s_{pr}}\right)^2+\left(X_{ys}+\sigma_1 X_{yrk}'\right)^2\right.} \quad (3)$$

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} \quad (4)$$

$$s_{pr} = \pm\frac{\sigma_1 R_r'}{\sqrt{R_s^2+\left(X_{ys}+\sigma_1 X_{yrk}'\right)}} \quad (5)$$

$$\sigma_1 = 1+\frac{X_{ys}}{X_m} \quad (6)$$

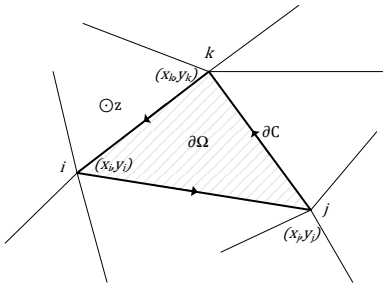
4. МЕТОДА КОНАЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА

Метода коначних елемената (*Finite Element Analysis - FEA*) представља нумеричко-графичку методу за анализу електромагнетских поља у доменима са сложеном диспозицијом извора поља и сложеном геометријом домена од интереса. Заснива се на подели посматраног домена на велики број малих, међусобно неповезаних коначних елемената, унутар којих се приближно решавају једначине електромагнетског поља. На основу тога, метода коначних елемената омогућава детаљан увид у карактеристике магнетског поља на нивоу појединачног коначног елемента. Најзахтевнији аспект имплементације тих метода у анализи рада ротационих електричних машина јесте променљива геометрија као последица ротације ротора у односу на статор, са једним степеном слободе (у случају анализе понашања када машина има одређену врсту ексцентритета, ово кретање може да буде и значајно сложеније за проучавање), као и употреба нелинеарних феромагнетских материјала за израду магнетског кола машине. У одређеним случајевима анализа се може поједноставити занемаривањем кретања ротора, попут режима кратког споја односно рада у режиму са закоченим ротором. Када није неопходно потпуно тродимензионално моделовање машине, проблем се често може апроксимирати дводимензионалним попречним пресеком. Овакав приступ значајно смањује сложеност модела и убрзава нумеричке прорачуне, при чему резултати остају доследни.

Анализом резултата добијених прорачуном се могу добити изузетно детаљни подаци о

електромагнетским појавама у електричној машини, у било ком делу њеног пресека. Метода коначних елемената је изведена из опште теорије електромагнетских поља, увођењем одређених помоћних векторских и електричних величина које су познате под називом потенцијали електромагнетског поља.

По правилу се детаљна истраживања и експерименти много чешће врше на машинама великих снага и димензија, што за методу представља додатно оптерећење, јер се нумерички проблем мора решавати у великом броју тачака. Велики проблем представља и време које је потребно да се изврши нека симулација, које се често мери у данима, чак и недељама. Скраћење потребног времена, а без губитка прецизности се може постићи коришћењем симетрије машине, јер се слика магнетског поља у машини циклично понавља онолико пута колико машина има магнетских полова. Та особина дозвољава да се моделује само један исечак пресека машине, која заузима ширину само једног магнетског пола. Међутим, овакво упрошћење није погодно при анализи унутрашњих кварова електричних машина, јер су кварови углавном асиметрични и не понављају се равномерно дуж целог обода машине. У случајевима попут ових неопходно је моделовати комплетну геометрију машине ради добијања реалних резултата [3].



Слика 3. Коначни елемент у облику троугла [3]

Релација (7) може да се интерпретира као скаларна једначина, у којој све наведене векторске величине имају искључиво z компоненту.

$$\frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2}\right)=-J_{0izv}+\sigma\left(\frac{\partial A}{\partial t}+grad_z V\right) \qquad (7)$$

Применом Галеркинове методе тежинских резидуала добија се коначна формула која се заснива на коначним елементима.

$$\sum_{l=1}^{L}\left\{\begin{array}{l}\frac{1}{4\partial\Omega^l\mu^l}\begin{bmatrix}s_{ii} & s_{ij} & s_{ik}\\ s_{ij} & s_{jj} & s_{jk}\\ s_{ik} & s_{jk} & s_{kk}\end{bmatrix}^l\begin{bmatrix}\hat{A}_{zi}\\ \hat{A}_{zj}\\ \hat{A}_{zk}\end{bmatrix}^l+\\ \frac{\sigma^l\partial\Omega^l}{12}\begin{bmatrix}2 & 1 & 1\\ 1 & 2 & 1\\ 1 & 1 & 2\end{bmatrix}\frac{\partial}{\partial t}\begin{bmatrix}\hat{A}_{zi}\\ \hat{A}_{zj}\\ \hat{A}_{zk}\end{bmatrix}^l-\frac{J_{izv}{}^l\partial\Omega^l}{3}\begin{bmatrix}1\\1\\1\end{bmatrix}\end{array}\right\}=0 \qquad (8)$$

Укупан број коначних елемената је означен са L, док је индекс текућег елемента означен са l [3].

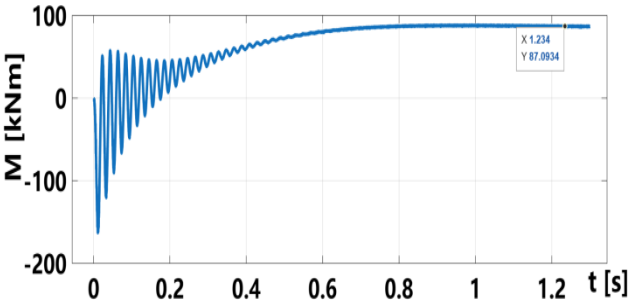
5. РАДНИ РЕЖИМИ АСИНХРОНЕ МАШИНЕ

5.1. Асинхрона машина у моторском режиму рада

Асинхрона машина прикључена на мрежу може радити као мотор, генератор или у режиму електромагнетске кочнице. Електрична снага (P_{el}) преузета из мреже се у моторском режиму рада претвара у механичку снагу (P_{meh}) и предаје на осовину. У овом режиму рада машина производи механички момент (M_m) којим се може савладати механички момент неке радне машине прикључене на осовину. Брзина мотора (n) се мења од нулте до асинхроне брзине обртања.

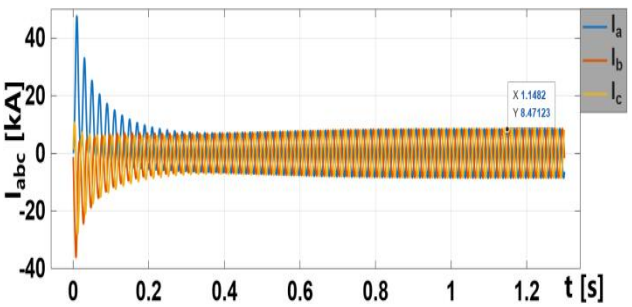
Биланс снага асинхроне машине у моторском режиму рада се може објаснити на следећи начин: на улазу имамо електричну снагу (P_{el}) коју мотор узима из мреже. Када од електричне снаге (P_{el}) одузмемо губитке у гвожђу (P_{Fe}) и бакру статора (P_{Cus}) добијемо снагу обртног поља (P_{ob}). Затим, следе губици у бакру ротора (P_{Cur}) чија је повезница са снагом обртног поља (P_{ob}) представљена преко клизања (s) машине. Када одузмемо од снаге обртног поља (P_{ob}) губитке у бакру ротора (P_{Cur}) добијамо снагу конверзије P_c. И на излазу када од снаге конверзије (P_c) одузмемо механичке губитке (P_{mg}) добијамо механичку излазну снагу (P_{meh}) [1].

На основу примене софтвера и његовим прилагођавањем података за моторски радни режим добијене су карактеристичне величине од значаја. Издвајају се карактеристике промене момента, струје, електричне и механичке снаге у времену које су представљене на сликама 4, 5, 6 и 7.



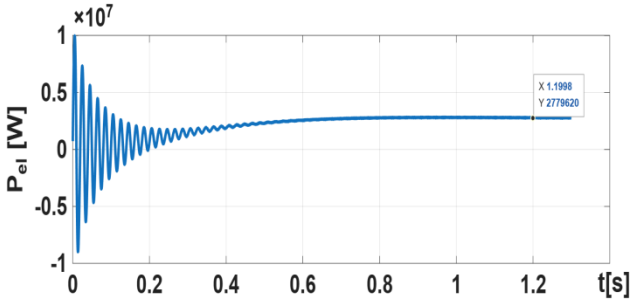
Слика 4. Електромагнетски момент асинхроне машине у моторском режиму рада

У почетку имамо електромагнетске прелазне појаве које се јављају услед успостављања магнетског поља у машини. Након 0,6 s долази до пригушења ових осцилација, где се електромагнетски момент устаљује око вредности од 87 kNm као што се види на слици 4. Позитивна вредност момента нам говори да асинхрона машина ради у моторском режиму рада.



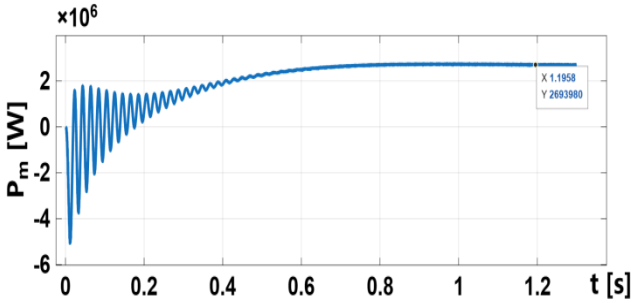
Слика 5. Струја по фазама асинхроне машине у моторском режиму рада

Покретањем асинхроне машине долази до великих стартних струја које су преко 5 пута веће од номиналне вредности. Овако велике струје су карактеристичне за директан старт мотора. Приказане су три фазе на слици 5 које су међусобно померене за 120°, док су амплитуде приближно исте вредности.



Слика 6. Електрична снага асинхроне машине у моторском режиму рада

Велике промене струје и магнетског поља изазивају осцилације снаге као што се види на слици 6. До краја прелазних процеса долази након 0,6 s када се снага устаљује на вредности око 2,77 MW.



Слика 7. Механичка снага асинхроне машине у моторском режиму рада

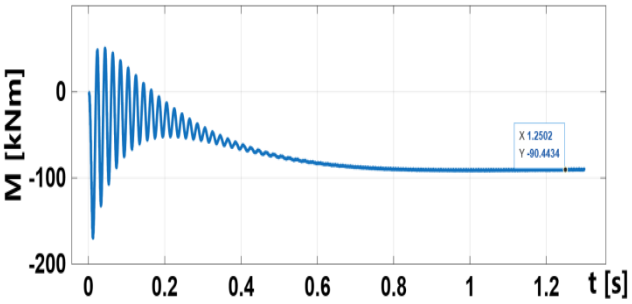
Излазна механичка снага зависи од момента и брзине, осцилације које се јављају приликом успостављања снаге директна су последица осцилација момента. Осцилације се пригушују након 0,6 s и механичка снага се устаљује на вредности око 2,7 MW. Видимо да се вредност механичке снаге на слици 7 разликује од улазне електричне снаге, а то је последица тога што је та снага потрошена на губитке.

5.2. Асинхрона машина у генераторском режиму рада

Генераторски режим рада асинхроне машине настаје када погонска машина на осовину доведе механичку снагу (P_{meh}) тако да се брзина обртања ротора повећа изнад брзине обртања статора, односно изнад брзине обртног поља. Када се ово деси, асинхрона машина претвара механичку снагу (P_{meh}) доведену на осовину у електричну снагу (P_{el}) која се даље предаје у мрежу. Као што је већ напоменуто, брзина обртања ротора је изнад брзине обртног поља, што значи да је клизање (s) негативно, односно клизање је мање од нуле.

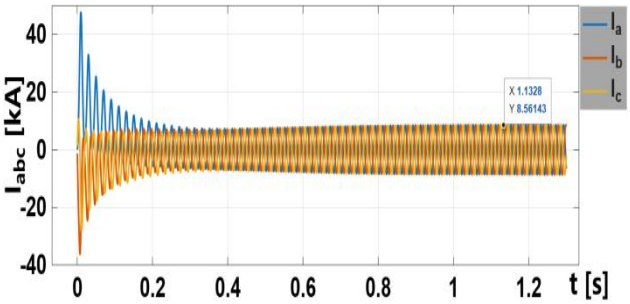
Биланс снага асинхроне машине у генераторском режиму рада се може објаснити на следећи начин: принцип је сличан као у моторском режиму, само сада можемо рећи да идемо у обрнутом смеру. Ми од улазне механичке снаге (P_{meh}) одузимамо механичке губитке (P_{mg}) и добијамо снагу конверзије (P_c), одузимањем губитака у бакру ротора (P_{Cur}) од снаге конверзије (P_c) добија се снага обртног поља (P_{ob}). На крају када од снаге обртног поља (P_{ob}) одузмемо губитке у бакру статора (P_{Cus}) и губитке у гвожђу (P_{Fe}) добијамо излазну електричну снагу (P_{el}) [1].

На основу примене софтвера и његовим прилагођавањем података за генераторски радни режим добијене су карактеристичне величине од значаја. Издвајају се карактеристике промене момента, струје, електричне и механичке снаге у времену које су представљене на сликама 8, 9, 10 и 11.



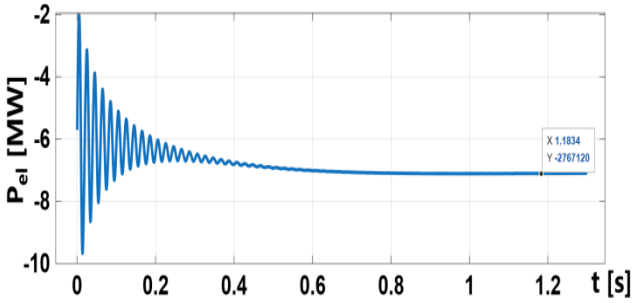
Слика 8. Електромагнетски момент асинхроне машине у генераторском режиму рада

Имамо појаву електромагнетских прелазних појава које се јављају услед успостављања магнетског поља у машини. Након 0,6 s долази до пригушења ових осцилација, где се електромагнетски момент устаљује око негативне вредности од -90 kNm, што се може видети на слици 8. Негативна вредност момента нам говори да асинхрона машина ради у генераторском режиму рада.



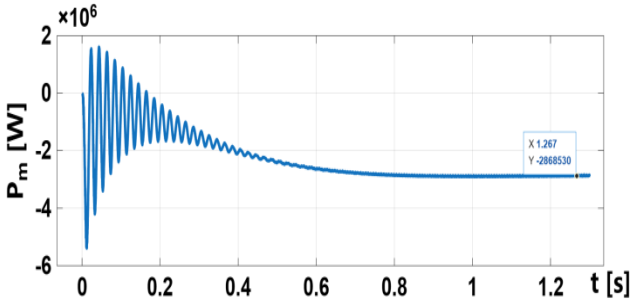
Слика 9. Струја по фазама асинхроне машине у генераторском режиму рада

Покретањем асинхроне машине долази до великих стартних струја које су преко 5 пута веће од номиналне вредности. Овако велике струје су карактеристичне за директан старт мотора. Приказане су три фазе на слици 9 које су међусобно померене за 120°, док су амплитуде приближно исте вредности.



Слика 10. Електрична снага асинхроне машине у генераторском режиму рада

Промене струје и магнетског поља доводе до осцилација снаге. Прелазни процес ишчезава након 0,6 s када се снага устаљује на негативној вредности око -2,76 MW. На слици 10 се види да је електрична снага у овом режиму мања од механичке снаге, где се разлика потрошила на губитке.



Слика 11. Механичка снага асинхроне машине у генераторском режиму рада

Улазна механичка снага, као што је претходно наведено, зависи од момента и брзине. Осцилације које се јављају приликом успостављања снаге директна су последица осцилација момента. Осцилације се пригушују након 0,6 s и механичка снага се устаљује на негативној вредности око -2,85 MW, што је видљиво на слици 11.

6. ЗАКЉУЧАК

Из карактеристичних одзива добијају се резултати за наведене величине током прелазног и стационарног периода. Резултати показују да се након покретања асинхроне машине јављају изражене прелазне појаве које су праћене осцилацијама карактеристичних величина. Све ове величине се устаљују на одређеним вредностима након што прелазни процеси ишчезну. Симулација је показала да модел описује динамичко понашање асинхроне машине и омогућава поуздану анализу током покретања и рада под оптерећењем.

7. ЛИТЕРАТУРА

[1] В. Васић, *Асинхроне машине – презентације са наставе*, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, Нови Сад.

[2] Техничка *документација испитиване асинхроне машине*, интерна документација произвођача.

[3] Д. Јеркан, *Пројектовање електричних машина – презентације са наставе*, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, Нови Сад, 2016.

[4] The MathWorks, Inc., *MATLAB R2025a Software Package*, Natick, MA, USA, 2025.

Кратка биографија:

Драгомир Васић рођен је у Зворнику 08.06.2000. год. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Електротехнике и рачунарства – Енергетска електроника и електричне машине одбранио је 2026. год.
Контакт:
dragomirvaske1@gmail.com

Дејан Јеркан је ванр. проф. на Факултету техничких наука у Новом Саду, на Катедри за енергетску електронику и претвараче. Област интересовања су му моделовање и дијагностика електричних машина, као и метода коначних елемената.

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 4.43
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36BE51Radivojevic

Имплементација *Spring MVC* веб апликација уз ослонац на инжењерство вођено моделима

Implementation of Spring MVC Web Applications Based on Model-Driven Engineering

Александар Радивојевић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – РАЧУНАРСТВО И АУТОМАТИКА

Кратак садржај – *У овом раду представљен је генератор програмског кода који генерише Java и HTML датотеке за Spring MVC веб апликације. Генератор као улаз користи UML модел класног дијаграма серијализован у XMI формату. Над моделем су примењени стереотипи UML профила SpringMVCProfile у алату Eclipse Papyrus. Примена генератора демонстрирана је у домену библиотечког информационог система БИСИС, на моделу циркулације.*

Кључне речи: *генератори кода, инжењерство вођено моделима, Spring MVC*

Abstract – *This work presents a code generator that produces Java and HTML source files for Spring MVC web applications. The generator takes as input a UML class diagram model serialized in the XMI format. The stereotypes of the SpringMVCProfile UML profile were applied to the model in the Eclipse Papyrus tool. The application of the generator is demonstrated in the domain of the BISIS library information system, on the circulation model.*

Keywords: *code generators, model-driven engineering, Spring MVC*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је била др Гордана Милосављевић, ред. проф.

1. УВОД

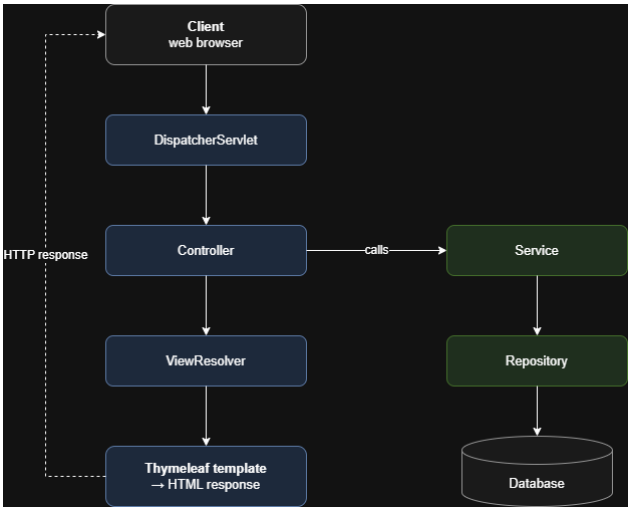
Сложеност савремених софтверских система непрекидно расте, а са њом и количина програмског кода који је потребно одржавати, синхронизовати и развијати кроз више технолошких слојева. Традиционални развој, заснован на ручном писању кода, не прати ову динамику – додавање или измена компоненте захтева усклађивање над више нивоа апликације, од базе података преко серверске до клијентске стране. Модерни алати за развој софтвера, као што је *IntelliJ IDEA*, нуде аутоматизовано рефакторисање (енг. *refactoring*), међутим када су у питању вишеслојне веб апликације, оно је ограничено искључиво на серверску страну (енг. *backend*). Једно од решења је софтверско инжењерство вођено моделима (енг. *Model-Driven Software Engineering, MDSE*), или краће инжењерство вођено моделима (енг. *Model-Driven Engineering, MDE*). *MDE* представља приступ у којем модели не служе само као документација, већ као примарни елементи из којих се могу аутоматски или полуаутоматски генерисати софтверске компоненте [1]. У овом раду принципе *MDE* примењујемо кроз језик за моделовање *UML* (*Unified Modeling Language*) [2] у алату *Eclipse Papyrus* [3]. Користећи класни дијаграм (енг. class diagram) моделујемо ентитете и њихове везе, а дијаграм се серијализује у *XMI* формату (*XML Metadata Interchange*). Овакав формат је погодан за програмску обраду и парсирање (енг. *parse*) након којег се модел трансформише у *Java* доменске објекте погодне за генерисање кода. Генератор применом *Apache FreeMarker* [4] шаблона (енг. *templates*) над *Java* објектима производи изворни код апликације. Као циљна платформа изабран је *Spring MVC – framework* за развој веб апликација у *Java* екосистему, чија слојевита архитектура природно одговара структури коју је могуће извести из *UML* модела. Практична примена генератора кода демонстрирана је у домену библиотечког информационог система БИСИС [5], на моделу циркулације.

2. АРХИТЕКТУРА SPRING MVC ВЕБ АПЛИКАЦИЈА

Spring MVC је веб *framework*, део *Spring* платформе, који користи *MVC* (енг. *Model-View-Controller*), архитектурни образац који раздваја апликациону логику на три међусобно повезане компоненте:

- ***Model*** – представља податке и пословну логику апликације. У контексту *Spring MVC*-а, модел обухвата објекте који се прослеђују презентационом слоју ради приказа.
- ***View*** – одговоран је за визуелни приказ података кориснику.
- ***Controller*** – прихвата *HTTP* захтеве од клијента, делегира обраду сервисном слоју и враћа одговарајући *view* са припремљеним подацима.

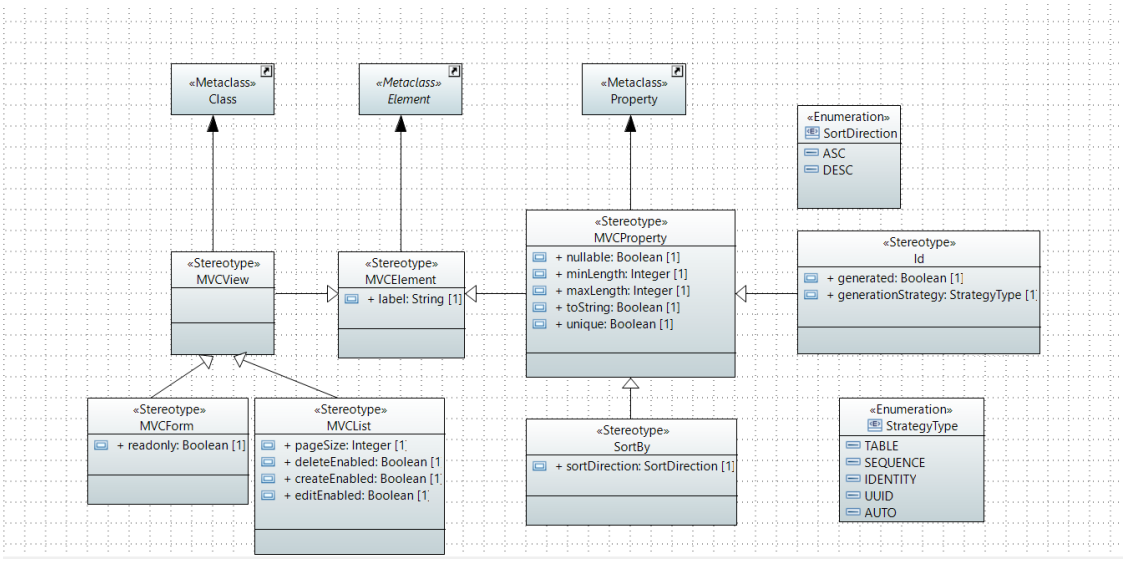
Апликације засноване на *Spring MVC* типично се организују у слојеве, од којих сваки има јасно дефинисану одговорност: *Entity* (*JPA* ентитети који се пресликавају на табеле у бази), *Repository* (приступ подацима кроз *Spring Data JPA*), *Service* (пословна логика), *Controller* (обрада *HTTP* захтева) и *DTO*/*Mapper* (раздвајање презентационог од ентитетског слоја).
Пример тока једног *HTTP* захтева у *Spring MVC* приказан је на слици 1.



Слика 1. Ток обраде *HTTP* захтева кроз слојеве *Spring MVC* апликације

3. ДЕФИНИСАЊЕ ПРОФИЛА

Профил *SpringMVCProfile* (Слика 2) дефинисан је у алату *Eclipse Papyrus*. Профил проширује стандардни *UML* увођењем стереотипа прилагођених домену *Spring MVC* веб апликација, где сваки стереотип садржи означене вредности које прецизирају понашање генерисаног кода.
SpringMVCProfile састоји се од стереотипа:
MVCElement – проширује метакласу *Element*, садржи атрибут *label* за назив елемента
MVCProperty - проширује метакласу *Property,* наслеђује *MVCElement*, садржи атрибуте за опис својства ентитета (*nullable, minLength, maxLength, toString, unique*).
MVCView – проширује метакласу *Class,* наслеђује *MVCElement*, апстрактни стереотип за *view*
MVCForm – наслеђује *MVCView*, служи за означавање форме на View-у, садржи атрибут *readonly* – да ли је могуће мењати елемент.
MVCList – наслеђује *MVCView*, служи за означавање приказа листе на *view*-у, садржи атрибуте: *pageSize, deleteEnabled, createEnabled, editEnabled.*
SortBy – наслеђује *MVCProperty* и служи за означавање елемента по ком се сортира листа, садржи атрибут sortDirection који дефинише смер сортирања, одређен енумерацијом *SortDirection*
Id – наслеђује *MVCProperty* и служи за означавање примарног кључа, садржи атрибут *generated* – да ли је аутоматски генерисан и *generationStrategy* који дефинише тип стратегије генерисања, одређен енумерацијом *StrategyType.*
Профил садржи и две енумерације:
SortDirection – одређује смер сортирања листе. Могуће вредности *ASC* и *DESC*
StrategyType – одређује стратегију генерисања примарног кључа у бази података.
Могуће вредности: *TABLE*, *SEQUENCE*, *IDENTITY*, *UUID* и *AUTO*.

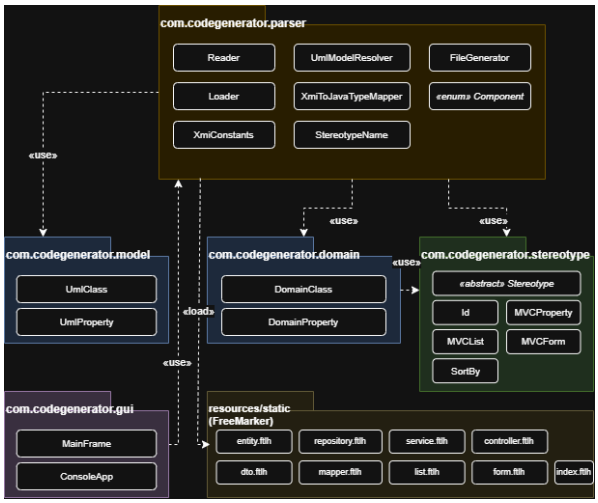


Слика 2. *UML* Профил *SpringMVCProfile*

4. АРХИТЕКТУРА ГЕНЕРАТОРА ПРОГРАМСКОГ КОДА

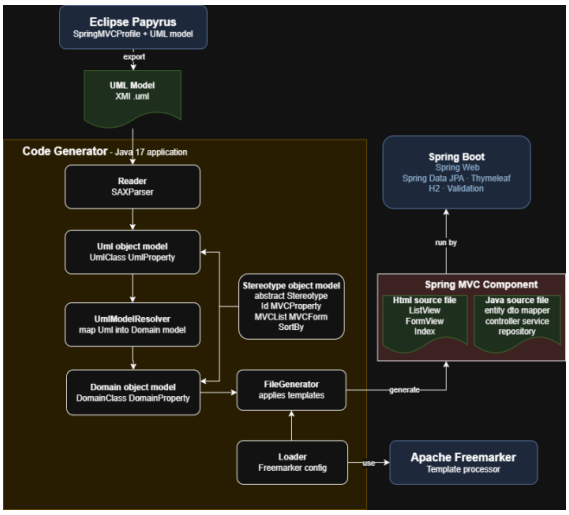
Генератор програмског кода имплементиран је у језику *Java* 17 и ослања се на *SAX* парсер за читање модела и *Apache FreeMarker* за генерисање изворног кода на основу шаблона. Организован је у пет Java пакета и директоријум са *FreeMarker* шаблонима (Слика 3).
Јава пакети су:
com.codegenerator.parser – садржи класе задужене за читање *XMI* датотеке и генерисање излазних компоненти: *Reader*, *UmlModelResolver*, *FileGenerator*, *Loader*, *XmiToJavaTypeMapper*, као и помоћне класе

XmiConstants, *StereotypeName* и енумерацију *Component*.
com.codegenerator.model – садржи класе *UmlClass* и *UmlProperty* које представљају *UML* модел директно попуњен из *XMI* парсера.
com.codegenerator.domain – садржи класе *DomainClass* и *DomainProperty* које представљају доменски модел прилагођен за потребе *FreeMarker* шаблона.
com.codegenerator.stereotype – садржи класе које моделују стереотипе из *SpringMVCProfile* профила: апстрактна базна класа *Stereotype* и њене конкретне имплементације *Id*, *MVCProperty*, *MVCList*, *MVCForm* и *SortBy*.
com.codegenerator.gui – садржи графички (*MainFrame*) и конзолни (*ConsoleApp*) интерфејс за покретање генератора.
FreeMarker шаблони налазе се у директоријуму src/main/resources/static/ и носе називе по компонентама које генеришу: *entity.ftlh, repository.ftlh, service.ftlh, controller.ftlh, dto.ftlh, mapper.ftlh, list.ftlh, form.ftlh u index.ftlh.*



Слика 3. Организација пакета пројекта

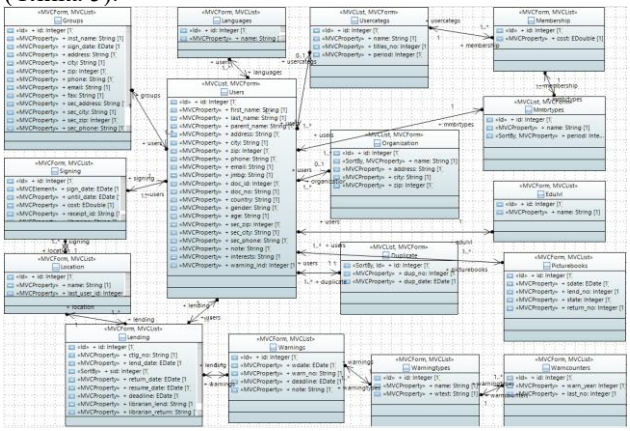
На слици 4 приказана је архитектура генератора програмског кода. Процес генерисања подељен је у више фаза:
Читање и парсирање – Улаз у генератор је формат *XMI*, серијализација *UML* модела класног дијаграма са примењеним стереотипима профила *SpringMVCProfile*. *SAX* парсер (класа *Reader*) секвенцијално парсира *XMI* датотеку и издваја *UML* класе, атрибуте и примењене стереотипе, при чему класа *XmiToJavaTypeMapper* мапира *UML*/*Ecore* типове на одговарајуће *Java* типове.
Обрада и мапирање на доменски модел – класа *UmlModelResolver* семантички обрађује парсиране *UML* елементе кроз три корака: разрешава асоцијације, одређује кардиналност релација и трансформише *UML* модел (*UmlClass*, *UmlProperty*) у доменски модел (*DomainClass*, *DomainProperty*) и повезује примењене стереотипе са одговарајућим елементима доменског модела.
Примена шаблона и генерисање датотека – Класа *FileGenerator* за сваку класу из доменског модела примењује одговарајуће *FreeMarker* шаблоне по компонентама и генерише датотеке изворног кода. Резултат генерисања је комплетна вишеслојна *Spring MVC* веб апликација која садржи ентитете, репозиторијуме, сервисе, контролере, *DTO* објекте, мапере и *Thymeleaf HTML view*.



Слика 4. Архитектура *CodeGenerator*-а

5. ПРИМЕНА НА МОДЕЛУ ЦИРКУЛАЦИЈЕ

Примена генератора демонстрирана је за домен библиотечких информационих система (БИСИС), на моделу циркулације. У *Eclipse Papyrus*-у је дефинисан класни дијаграм модела циркулације над којим су примењени стереотипи из профила *SpringMVCProfile* (Слика 5).

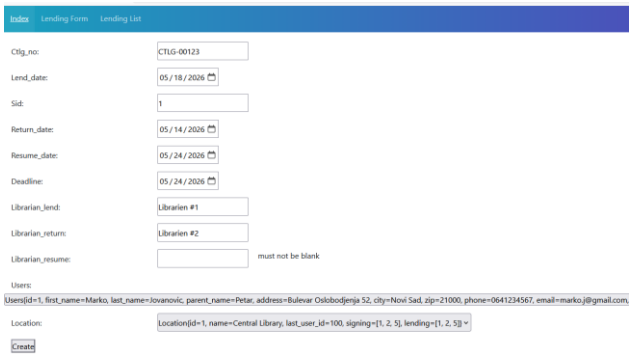


Слика 5. Дијаграм класа модела циркулације

Користећи дијалог *MainFrame* или конзолну апликацију *ConsoleApp* са подешеном путањом до локације модела циркулације као улазом и путањом до *Spring Boot* пројекта као излазом, генерише се програмски код. Пример једне генерисане форме приказан је на слици 6.

6. ЗАКЉУЧАК

У оквиру овог рада пројектован је и имплементиран генератор програмског кода који на основу *UML* класног дијаграма, са примењеним стереотипима из профила *SpringMVCProfile*, аутоматски производи комплетну *Spring MVC* веб апликацију. Примена генератора верификована је на моделу циркулације библиотечког информационог система БИСИС, где је



Слика 6. Генерисана форма *Lending*

из једног модела од 16 класа аутоматски генерисано 129 датотека. Коришћењем генератора убрзава се развој и смањује број грешака у односу на ручно писање кода. Синхронизација између слојева *Spring MVC* веб апликације постиже се новим покретањем генератора, свака промена у моделу одражава се на све генерисане компоненте. Примена моделом вођеног приступа у алату *Eclipse Papyrus* обезбеђује прегледност при пројектовању веб апликација, јер се домен дефинише кроз ентитете и њихове везе на нивоу класног дијаграма. Недостатак приступа произилази из самог алата *Eclipse Papyrus*, који не подржава групну примену стереотипа над елементима класног дијаграма, сваки атрибут и свака класа морају се означити појединачно, што за веће моделе постаје једноличан и временски захтеван процес. Потенцијални правци даљег развоја укључују подршку за генерисање *REST API* контролера и интеграцију генератора у *CI*/*CD* процес.

7. ЛИТЕРАТУРА

[1] M. Brambilla, J. Cabot, and M. Wimmer. Model-Driven Software Engineering in Practice, 2nd Edition. Morgan & Claypool Publishers, 2017.

[2] Object Management Group. OMG Unified Modeling Language (OMG UML), Version 2.5.1. OMG Document Number formal/2017-12-05, 2017.

[3] Eclipse Papyrus. https://eclipse.dev/papyrus/

[4] The Apache Software Foundation. Apache FreeMarker Manual. https://freemarker.apache.org/

[5] Библиотечки информациони систем (БИСИС). https://www.bisis.rs/

Кратка биографија:



Александар Радивојевић рођен је у Лесковцу 1991. год. Дипломирао је на Факултету техничких наука, област Електротехника и рачунарство – Примењене рачунарске науке и информатика 2015. год. Исте године уписао је мастер студије на смеру Инжењеринг информационих система.
Контакт:
radivojevic.aleksandar91@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 4.9
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36BE52Petrovic

Компаративна анализа одабраних приступа оптимизацији претраге у архитектури *RAG*

Comparative Analysis of Selected Retrieval Optimization Approaches in RAG Architecture

Сања Петровић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – РАЧУНАРСТВО И АУТОМАТИКА

Кратак садржај – *Унапред обучени језички модели често немају знање из уско специјализованих домена као што је фармација, а додатан изазов представља и употреба српског језика. Због тога је потребна архитектура генерисања потпомогнутог претрагом (енгл. Retrieval-Augmented Generation (RAG)), која генеративни велики језички модел проширује са базом екстерног знања. Постоје бројни приступи којима је могуће побољшати претрагу унутар архитектуре RAG, али је неопходно анализирати и оценити њихов утицај у контексту домена фармације на српском језику. Из тог разлога спроведен је експеримент компаративне анализе утицаја приступа филтрирања на основу метаподатака, хибридне претраге, диверзификације и трансформације упита, чији су резултати представљени у овом раду.*

Кључне речи: *Архитектура RAG, компаративна анализа, векторска база података, велики језички модел, модел уграђивања*

Abstract – *Pre-trained language models often lack knowledge of narrowly specialized domains such as pharmacy, and the use of the Serbian language poses an additional challenge. For this reason, a Retrieval-Augmented Generation (RAG) architecture is needed, which extends a generative large language model with an external knowledge base. There are numerous approaches for improving retrieval within a RAG architecture, but it is necessary to analyze and evaluate their impact in the context of the pharmacy domain in the Serbian language. Therefore, a comparative analysis experiment was conducted on the impact of metadata-based filtering, hybrid search, diversification, and query transformation approaches, the results of which are presented in this paper.*

Keywords: *Architecture RAG, comparative analysis, vector database, large language model, embedding model*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Марко Вјештица, доцент.

1. УВОД

Последњих година забележен је раст развоја и примене вештачке интелигенције, при чему су велики језички модели (енгл. *Large Language Models* (*LLM*)) нашли примену у многим сферама савременог друштва и индустрије. Како су обучени на јавно доступним подацима, често не располажу тачним и ажурним информацијама из уско специјализованих домена. Једно решење за тај проблем је архитектура генерисања потпомогнуто претрагом (енгл. *Retrieval-Augmented Generation* (*RAG*)), која комбинује генеративни модел са базом екстерног знања у сврху проширења контекста модела.

Циљ овог мастер рада је да пружи опште смернице приликом одабира приступа оптимизацији претраге у домену фармације на српском језику. Садржај рада обухвата теоријске концепте архитектуре *RAG*, као и експеримент. У оквиру експеримента упоређено је више приступа оптимизацији претраге унутар система који имплементира архитектуру *RAG* при чему је систем пројектован као виртуелни асистент у улози фармацеутског стручњака који одговара на питања о лековима на српском језику.

2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ АРХИТЕКТУРЕ *RAG*

Архитектура *RAG* обухвата приступ са три међусобно повезане фазе: индексирање базе података, претрагу и генерисање одговора.

2.1. Фазе приступа архитектуре *RAG*

Индексирање базе података обухвата прикупљање и пречишћавање изворних, најчешће текстуалних података, њихову поделу на мање сегменте поступком сегментације, као и трансформисање сегмената у густе или ретке векторе који се чувају у векторској бази података [1].

Претрага базе података представља централну фазу архитектуре *RAG*, у којој претраживач кориснички упит трансформише у векторску репрезентацију истим моделом уграђивања примењеним при индексирању, а затим врши претрагу базе података ради проналажења

најрелевантнијих сегмената који се прослеђују генератору као контекст [1].

Генерисање представља завршну фазу у архитектури *RAG*, при чему се одговор генерише на основу допремљених сегмената који служе као контекст и системске инструкције понашања генератора [2].

2.2. Приступи оптимизације претраге у архитектури *RAG*

Трансформација упита је приступ оптимизацији претраге који подразумева модификацију корисничког упита пре прослеђивања претраживачу, а обухвата технике попут преформулисања упита, преформулисања на више упита, проширења упита, декомпозиције упита, уграђивања хипотетичких докумената и враћања упита корак уназад [2].

Филтрирање на основу метаподатака је приступ оптимизацији претраге која сужава простор претраге на основу структуираних атрибута придружених сегментима приликом индексирања [3].

Хибридна претрага комбинује ретке векторе, попут оних насталих функцијом најбољег подударања (енгл. *Best Matching 25* (*BM25*)), и густе векторе тако што иницијално претражује базу података помоћу оба механизма, спаја резултате у јединствену листу, а затим их поново рангира [2].

Приликом претраживања комплексних докумената може се десити да неколико најбоље рангираних сегмената садржи готово идентичне информације. Скуп резултата може се диверзификовати алгоритмом максималне маргиналне релевантности (енгл. *Maximal Marginal Relevance* (*MMR*)) [4].

2.3. Евалуација архитектуре *RAG*

Радни оквир за процену архитектуре *RAG* (енгл. *Retrieval-Augmented Generation Assessment* (*RAGAs*)) представљен је 2024. године [5]. Овај радни оквир дефинише више метрика, од којих су у овом раду представљене прецизност контекста, одзив контекста, верност и релевантност одговора.

Прецизност контекста процењује способност претраживача да релевантне сегменте рангира испред нерелевантних у листи преузетих резултата. Одзив контекста рачуна у којој мери је претраживач успео да преузме све информације неопходне за тачан одговор. Верност мери колико је генерисани одговор заснован на преузетом контексту. Релевантност одговора процењује у којој мери генерисани одговор директно и потпуно адресира постављени упит [6].

3. ПРИПРЕМА ЕКСПЕРИМЕНТА

Агенција за лекове и медицинска средства Србије (*АЛИМС*) је државна институција задужена за регулацију и документацију лекова и медицинских средстава унутар Републике Србије. У њиховој надлежности је, између осталог, да за сваки лек саставе Сажетак карактеристика лека који описује својства и званично одобрене услове за употребу лека или медицинског средства.

Експеримент је пројектован на начин да одражава систем коме могу постављати питања стручна лица и пацијенти. Природа домена захтева високу тачност и поузданост одговора, али дозвољава чекање на одговор.

Унутар експеримента прате се представљене метрике прецизности и одзива контекста, верности и релевантности одговора како би се оценио квалитет претраге и генерисања одговора зависно од примењеног приступа оптимизацији претраге. Поред тога, експеримент обухвата и мерење финансијских трошкова и укупног времена потребно за извршавање сваког приступа оптимизацији претраге. Евалуација је спроведена над вештачки направљеним златним скупом података намењеним за тестирање.

3.1. Радно окружење

Уређај на којем је извршен експеримент је рачунар *MacBook M4 Pro*. Процесор се састоји од дванаест језгара. Капацитет радне меморије износи 24 *GB*, а максимална искоришћеност је ограничена на 12 *GB*. Рачунар поседује полупроводнички диск који је капацитета 512 *GB*.

3.2. Обрада изворног скупа података

Као изворни скуп података одабрани су Сажеци карактеристика лека. Обрада изворног скупа података подразумева три фазе: фазу преузимања, фазу трансформације и фазу сегментације.

Фаза преузимања података подразумева аутоматизовано прикупљање докумената и метаподатака са веб странице институције *АЛИМС* [7], чиме је преузето укупно 3779 докумената величине 868 *MB*, док се у фази трансформације ови подаци претварају у формат *Markdown.* Фаза сегментације користи приступ родитељ-дете, у складу са хијерархијском структуром Сажетка карактеристика лека, где је дете-сегмент најмања јединица текста, појединачни пасус или табела, а његов родитељ наслов или поднаслов унутар кога се налази.

3.3. Векторско уграђивање

За векторско уграђивање сегмената одабран је модел *voyage-context-3*. Осим густих вектора, у овом кораку креирају се и ретки вектори применом алгоритма *BM25*, а сви вектори се заједно са оригиналним садржајем и метаподацима сегмента чувају као равни индекси унутар једне колекције у векторској бази података *Qdrant*.

3.4. Претрага

У склопу експеримента, поред основне претраге, имплементирано је и неколико приступа оптимизацији претраге, а то су филтрирање на основу метаподатака, хибридна претрага са поновним рангирањем, диверзификација и трансформације упита које обухватају преформулисање, преформулисање на више упита, проширење, декомпозицију, уграђивање

хипотетичких докумената и враћање упита корак уназад. Ови приступи су одабрани након анализе домена и изворног скупа података, као и због међусобно сличног нивоа комплексности имплементације.

3.5. Генерисање одговора

Резултати претраге заједно са системском инструкцијом прослеђују се генератору који формулише коначан одговор на српском језику, при чему је одабран модел *gemini-3.1-flash-lite-preview*.

3.6. Евалуација

За потребе евалуације коришћен је радни оквир *RAGAs*. Процес евалуације се заснива на постојању златног скупа података који служи као референтни скуп парова питање-одговор. Имплементиран је сервис за евалуацију који процењује систем на основу датог питања, референтног одговора, пронађених сегмената и генерисаног одговора.

Одабране метрике за евалуацију су прецизност контекста, одзив контекста, верност и релевантност одговора. Евалуација захтева велики број позива апликативном интерфејсу модела судије, због чега је одабран велики језички модел *gemini-3.1-flash-lite-preview*.

Експеримент је подељен на два дела. Првенствено је тестирана контролна група B која чини основну варијанту имплементације без примене иједног приступа оптимизацији претраге, и варијанте које имплементирају приступе филтрирања на основу метаподатака (F), хибридне претраге са поновним рангирањем (H), диверзификације (MMR), као и њихове комбинације. Други део експеримента обухвата тестирање трансформације упита примењене над основном варијантом (B) и над најбољом варијантом из првог дела експеримента – комбинација филтрирања на основу метаподатака и хибридне претраге са поновним рангирањем, $(F + H)$. Тестирања су вршена у следећем редоследу, обележено одговарајућим индексом: преформулисање (r), преформулисање на више упита (m), проширење (e), декомпозиција (d), уграђивање хипотетичких докумената (h) и враћање упита корак у назад (s). За сваки део експеримента се мере и трошкови на основу укупне цене претраге и генерисања одговора за сва питања из златног скупа података, као и укупног времена које је потребно да се изврше претрага и генерисања одговора.

Експеримент се понавља пет пута ради поузданости резултата. Резултати свих понављања се агрегирају и рачуна се средња вредност за сваку метрику по варијанти, заокружено на две децимале.

4. РЕЗУЛТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТА

У наставку су дати резултати првог и другог дела експеримента у табеларном формату (Табеле 1 и 3), као и измерени трошкови и време извршавања упита (Табеле 2 и 4).

Табела 1. Резултати првог дела експеримента

Варијанта	Прецизност контекста	Одзив контекста	Верност	Релевантност одговора
B	0,81	0,60	0,83	0,77
F	0,81	0,71	0,89	0,85
H	0,91	0,67	0,85	0,84
MMR	0,97	0,54	0,78	0,80
$F + H$	0,87	0,77	0,94	0,92
$F + MMR$	0,92	0,59	0,86	0,91
$H + MMR$	0,93	0,59	0,85	0,89
$F + H + MMR$	0,93	0,59	0,85	0,89

Табела 2. Трошкови и време извршавања првог дела експеримента

Варијанта	Цена ($)	Време извршавања (s)
B	0,04	601,69
F	0,05	266,07
H	0,10	582,68
MMR	0,07	635,54
$F + H$	0,09	427,84
$F + MMR$	0,07	319,46
$H + MMR$	0,08	673,91
$F + H + MMR$	0,07	334,66

Табела 3. Резултати другог дела експеримента

Варијанта	Прецизност контекста	Одзив контекста	Верност	Релевантност одговора
B_r	0,84	0,55	0,85	0,74
B_m	0,82	0,55	0,86	0,82
B_e	0,87	0,61	0,80	0,75
B_d	0,55	0,55	0,55	0,55
B_h	0,83	0,64	0,88	0,80
B_s	0,86	0,61	0,84	0,80
$(F + H)_r$	0,86	0,79	0,93	0,90
$(F + H)_m$	0,83	0,74	0,93	0,91
$(F + H)_e$	0,87	0,83	0,94	0,92
$(F + H)_d$	0,87	0,83	0,94	0,93
$(F + H)_h$	0,86	0,80	0,95	0,92
$(F + H)_s$	0,88	0,79	0,93	0,91

Табела 4. Трошкови и време извршавања другог дела експеримента

Варијанта	Цена ($)	Време извршавања (s)
B_r	0,06	1003,94
B_m	0,07	1663,05
B_e	0,06	939,14
B_d	0,06	1596,73
B_h	0,06	1095,06
B_s	0,05	1047,04
$(F + H)_r$	0,14	583,20
$(F + H)_m$	0,26	699,05
$(F + H)_e$	0,16	695,68
$(F + H)_d$	0,22	723,57
$(F + H)_h$	0,17	747,30
$(F + H)_s$	0,14	712,98

5. ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА ЕКСПЕРИМЕНТА

Резултати експеримента показују да је за представљени систем филтрирање на основу метаподатака једна од значајнијих метода оптимизација претраге. У Табели 1 може се приметити да овај приступ оптимизацији претраге побољшава одзив контекста, верност и релевантност одговора, а Табела 2 показује да примена филтрирања на основу метаподатака скраћује и време извршавања. Природа домена система, као и изворног скупа докумената, се добро слаже са овим приступом, с обзиром да се може очекивати да значајан број постављених питања буде у вези са конкретним леком или активном супстанцом. Ограничење филтрирања на основу метаподатака је то

да се овај приступ не би могао применити на генеричка питања.

Хибридна претрага са поновним рангирањем такође побољшава квалитет претраге, посебно у комбинацији са филтрирањем на основу метаподатака, што се види у Табели 1. Разлог за побољшање успешности налази се у томе што систем ради са специјализованим терминима који се ретко налазе у вокабулару било ког модела опште намене, а ефекат овога је додатно изражен чињеницом да су подаци на српском језику.

Посматрајући резултате приказане у Табели 1, видљиво је да је приступ диверзификације у значајној мери допринео побољшању метрике прецизности контекста, али по цену погоршања метрике одзива контекста, што у осетљивом домену као што је фармација није погодно.

Када су у питању трансформације упита, резултати експеримента приказаних у Табели 3 показују да је утицај упита на претрагу ограничен уколико само претраживање има много шума. Пре трансформисања упита, препоручљиво је оптимизовати претрагу другим методама као што су филтрирање на основу метаподатака и хибридна претрага са поновним рангирањем. Такође, Табела 4 показује да трансформације упита повећавају трошкове и време извршавања, па би се препоручио опрез при одабиру овог приступа оптимизацији претраге.

6. ЗАКЉУЧАК

У овом раду представљено је поређење одабраних приступа оптимизацији претраге у архитектури *RAG* унутар домена фармације на српском језику.

Резултати експеримента наговештавају да архитектура *RAG* може бити погодан избор за претрагу великих скупова података унутар домена фармације на српском језику. Квалитет имплементације се може повећати уз примену одговарајућих приступа оптимизацији претраге као што су филтрирање на основу метаподатака и хибридна претрага густих и ретких вектора са поновним рангирањем, уз које у одређеним случајевима може бити корисно применити и трансформације упита.

Будући правац истраживања обухватио би проширење експеримента компонентом која ће на основу упита закључити да ли ће и на који начин извршити трансформацију упита. Додатно, потребно је интегрисати и графску базу података која би могла да побољша квалитет одговора на питања која обухватају разумевање комплексних веза између различитих ентитета. Такође, фино подешавање модела уграђивања би потенцијално омогућило боље резоновање специфичне терминологије из домена фармације на српском језику.

7. ЛИТЕРАТУРА

[1] A. Bansal, “Optimizing RAG with Hybrid Search and Contextual Chunking,” Journal of Engineering and Applied Sciences Technology, vol. 5, 2023, doi: 10.47363/JEAST/2023(5)E114.

[2] Y. Gao, Y. Xiong, X. Gao, K. Jia, J. Pan, Y. Bi, Y. Dai, J. Sun, M. Wang, and H. Wang, "Retrieval-augmented generation for large language models: A survey," arXiv preprint arXiv:2312.10997, 2023.

[3] M. Poliakov and N. Shvai, “ Multi-Meta-RAG: Improving RAG for Multi-Hop Queries using Database Filtering with LLM-Extracted Metadata,” in International Conference on Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications, Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, doi: 10.1007/978-3-031-81372-6_25.

[4] J. G. Carbonell and J. Goldstein, “The Use of MMR, Diversity-Based Reranking for Reordering Documents and Producing Summaries,” in Proceedings of the 21st Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (SIGIR '98), 1998, doi: 10.1145/290941.291025.

[5] S. Es, J. James, L. E. Anke, and S. Schockaert, “RAGAS: Automated Evaluation of Retrieval Augmented Generation“ in Proceedings of the 18th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics: System Demonstrations, 2024, doi: 10.18653/v1/2024.eacl-demo.16.

[6] https://docs.ragas.io/en/stable/concepts/metrics/available_metrics/ (приступљено у мају 2026.)

[7] https://www.alims.gov.rs/humani-lekovi/pretrazivanje-humanih-lekova/ (приступљено у мају 2026.)

Кратка биографија:

Сања Петровић рођена је у Алексинцу 2001. године. Основне академске студије уписала је 2019. године на Факултету техничких наука, студијски програм Рачунарство и аутоматика, који је завршила 2023. године. Након тога, уписала је мастер академске студије на Факултету техничких наука, студијски програм Рачунарство и информатика, стручна област Рачунарство високих перформанси.
Професионалну каријеру започела је 2022. године као софтверски инжењер, а од 2023. године ради на позицији инжењера података.
Контакт: petroviccsanja@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 4.3
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36BE53Tadic

Једно решење евалуационог радног оквира за дистрибуирано испитивање аудио система

An Evaluation Framework for Distributed Testing of Audio Systems

Милица Тадић, Јелена Ковачевић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И РАЧУНАРСТВО

Кратак садржај – *У овом раду предложен је евалуациони радни оквир који омогућава издвајање процеса евалуације из процеса извршавања тестова за уграђене аудио системе. Предложена архитектура подржава дистрибуирано извршавање компоненти система, као и дистрибуирано извршавање тестова, чиме се обезбеђују већа флексибилност и скалабилност. Предложени радни оквир доприноси лакшој интеграцији различитих метода евалуације, као и независно проширивање и прилагођавање процеса тестирања и евалуације.*
Кључне речи: *дигитална обрада сигнала, аутоматизовано испитивање, ДСП платформа*

Abstract – *This paper presents an evaluation framework that enables the separation of the evaluation process from the test execution process for embedded audio systems. The proposed architecture supports the distributed execution of system components and test cases, providing improved flexibility and scalability. The proposed framework facilitates the integration of different evaluation methods while enabling the independent extension and customization of the testing and evaluation processes.*

Keywords: *digital signal processing, automated testing, DSP platform*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је била др Јелена Ковачевић, ванр. проф.

1. УВОД

Током последњих неколико деценија дошло је до убрзаног развоја аудио технологија, па је репродукција аудио и видео садржаја, поред телевизора и кућних биоскопа, данас присутна у бројним уређајима потрошачке електронике. Савремени аудио системи, који укључују аудио/видео пријемнике и линијске звучнике (енгл. *soundbar*), засновани су на уграђеним системима, односно на наменским процесорима као што су дигитални сигнал процесори (енгл. *Digital Signal Processor*, *DSP*) или ARM (енгл. *Advanced RISC Machines*) платформе. Развој ових система праћен је изазовима као што су обрада сигнала у реалном времену, ограничени хардверски ресурси, као и потреба за прилагођавањем софтвера различитим хардверским платформама. Омогућавање извршавања софтвера на већем броју платформи доприноси широј примени производа и његовој конкурентности на тржишту [1].

Да би аудио производи успешно прошли процес сертификације и били спремни за пласирање на тржиште, неопходно је спроводити њихову верификацију током читавог животног циклуса развоја. Процес верификације разликује се између различитих аудио технологија, као што су *Dolby Atmos*, *DTS:X* и *MPEG-H Audio*, у погледу врсте тестова, начина евалуације резултата и расположивом окружењу за тестирање.

Иако постоје бројна решења за аутоматизацију испитивања софтвера, она углавном нису прилагођена специфичностима испитивања аудио технологија, док су индустријска решења најчешће затвореног карактера и недоступна широј употреби. Због тога је развијен униформни оквир за испитивање аудио система који обезбеђује јединствено окружење за аутоматизовано извршавање тестова [2].

У оквиру овог рада развијен је евалуациони радни оквир као проширење постојећег униформног оквира, са циљем раздвајања процеса извршавања тестова од евалуације резултата и омогућавања једноставније интеграције различитих процедура евалуације у јединствено окружење за испитивање аудио система.

2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ

Савремени аудио системи подржавају различите технологије просторног звука, укључујући канално оријентисане декодере, технологије засноване на објектима, виртуализаторе и додатне механизме завршне обраде. Засновани су на DSP и/или ARM платформама, на којима се извршава фирмвер који реализује комплетан ланац за обраду звука. Поред саме обраде сигнала, ови системи подржавају различите аудио интерфејсе и конфигурације звучника за репродукцију окружујућег (енгл. *surround*) и просторног (енгл. *surround*) звука.

Сложеност аудио технологија, ланаца обраде звука и великог броја подржаних интерфејса и конфигурација чини процес испитивања једним од кључних изазова у развоју оваквих система [3]. Испитивање уграђених система сложено је због ограничене преносивости постојећих алата и потребе за извршавањем великог

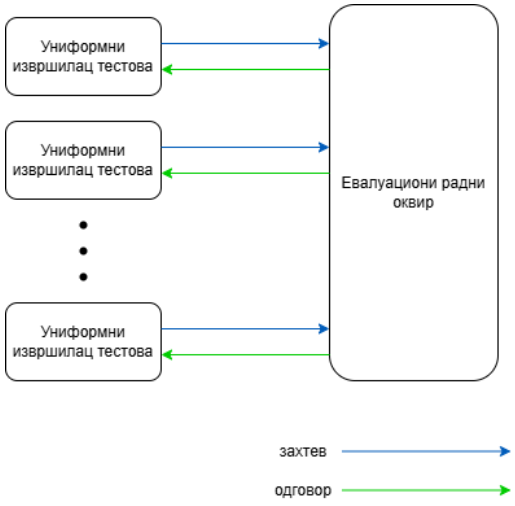
броја, често стотина или хиљада, тестних случајева током различитих фаза развоја. Испитивање се спроводи током целокупног животног циклуса производа, од провере компоненти система до сертификације и регресионих тестирања након надоградње фирмвера.

За развој уграђеног софтвера специфичних аудио технологија користи се референтни пакет који садржи информације неопходне за имплементацију, интеграцију и верификацију. Извршавањем тестова добијају се резултати који захтевају евалуацију према дефинисаним критеријумима, одређеним у оквиру референтног пакета [2].

У имплементацији аутоматизованог тестирања често се користе радни оквири (енгл. *framework*) који омогућавају ефикасније управљање тестним процесима, већу поузданост тестирања и лакше одржавање тестних активности [4]. У системима за аутоматизацију испитивања често се примењују дистрибуирани модели који омогућавају ефикасније управљање великим бројем тестних случајева и различитим конфигурацијама система. Дистрибуирани системи састоје се од скупа независних компоненти које чине јединствен систем [5]. Један од најчешћих модела је клијент-сервер архитектура заснована на моделу захтев-одговор. Комуникација компоненти може се реализовати без успостављања трајне конекције или уз њено успостављање, најчешће коришћењем REST API (енгл. *Representational State Transfer Application Programming Interface*) интерфејса, заснованог на употреби HTTP (енгл. *Hypertext Transfer Protocol*) протокола и стандардизованих метода за размену података између компоненти система [6]. Може бити синхрона или асинхрона, у зависности од захтева система, при чему се за паралелну обраду и управљање задацима често користе нити. Један од основних приступа за постизање скалабилности у дистрибуираним системима је расподела задатака на више извршних јединица. Уместо обраде у оквиру једне компоненте система, они се могу поделити и извршавати паралелно на више процеса или рачунара [5].

3. КОНЦЕПТ РЕШЕЊА

Полазни систем представља униформни оквир за испитивање аудио система, који омогућава паралелно извршавање тестова на више станица за испитивање [2]. Евалуациони радни оквир је његово проширење и чини софтверску основу за управљање и извршавање процеса евалуације. Пројектован је као серверска компонента која комуницира са клијентом интегрисаним у униформни извршилац тестова. Комуникација између клијентске и серверске компоненте заснива се на моделу захтев-одговор, при чему клијент иницира процес евалуације, а сервер врши конфигурисање, покретање и праћење евалуације и након завршетка враћа резултате. Слика 1. приказује комуникацију између евалуационог радног оквира и више инстанци униформног извршиоца тестова.



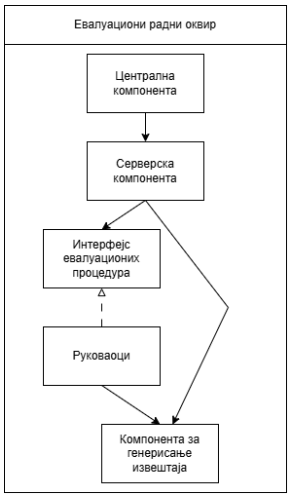
Слика 1. Комуникација између евалуационог радног оквира и више инстанци униформног извршиоца тестова

3.1. Архитектура система

Архитектура радног оквира чини пет целина:

1. Централна компонента,
2. Серверска компонента,
3. Спрега евалуационих процедура,
4. Руковаоци,
5. Компонента за генерисање извештаја.

Централна компонента је улазна тачка система и задужена је за његово покретање и иницијализацију серверске компоненте. Серверска компонента прихвата захтеве клијената, управља процесом евалуације и обезбеђује јединствену комуникациону спрегу према клијентима. Спрега евалуационих процедура дефинише начин имплементације, интеграције и извршавања евалуационих процедура кроз одговарајуће руковаоце. Руковаоци реализују конкретну логику евалуације специфичну за појединачне аудио технологије, чиме је омогућен униформни начин интеграције различитих евалуационих процедура у систем. Компонента за генерисање извештаја евидентира ток и резултате



Слика 2. Архитектура евалуационог радног оквира

процеса евалуације. Слика 2. приказује архитектуру евалуационог радног оквира.
Систем подржава локални и удаљени режим рада, који се разликују по месту извршавања клијентске и серверске компоненте. У локалном режиму обе компоненте се извршавају на истом рачунару, док се у удаљеном режиму извршавају на различитим рачунарима и комуницирају путем TCP/IP (енгл. *Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) протокола. Овакав приступ омогућава дистрибуирано извршавање тестова уз централизовану евалуацију.
Процес евалуације реализује се у оквиру једне сесије која обухвата све кораке од иницијализације до добијања резултата. Комуникација између клијента и сервера заснива се на REST API спреги, при чему клијент шаље метаподатке дефинисане у JSON (енгл. *JavaScript Object Notation*) конфигурационој датотеци, док се аудио подаци преузимају из заједнички доступног складишта.

3.2. Ток извршавања процеса евалуације

Процес евалуације започиње успостављањем сесије између клијента и сервера, при чему клијент прослеђује метаподатке неопходне за креирање одговарајућег руковаоца. Затим следи пренос података, након чега клијент покреће евалуацију слањем идентификатора захтева. Сервер прослеђује захтев руковаоцу који извршава евалуацију и враћа резултате клијенту. Пренос података и евалуација могу се понављати у оквиру исте сесије, која се по завршетку затвара. Ток процеса приказан је на слици 3. где зелене стрелице означавају кораке који се понављају за сваки тест, а црне кораке који се извршавају једном по сесији.



Слика 3. Ток извршавања процеса евалуације

4. ПРОГРАМСКО РЕШЕЊЕ

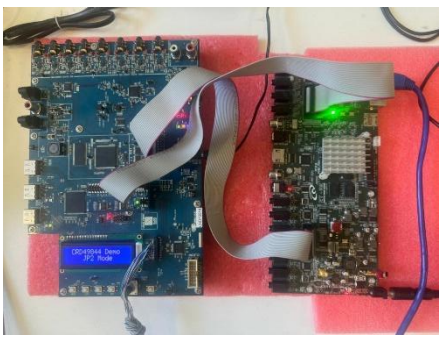
Решење је имплементирано у програмском језику *Python*. Претходно описане функционалне целине реализоване су као скуп међусобно повезаних модула. Извршавање започиње иницијализацијом серверске компоненте на основу конфигурационих параметара који одређују режим рада и ниво логовања. Серверска компонента реализована је коришћењем *FastAPI* радног оквира и покреће се помоћу *Uvicorn ASGI* сервера са 20 паралелних процеса, чиме се омогућава конкурентна обрада захтева. Функционалност система организована је кроз скуп крајњих тачака (енгл. *endpoints*) које реализују појединачне кораке процеса евалуације и управљање сесијом. Табела 1. приказује имплементиране крајње тачке и њихове намене.
Спрега евалуационих процедура дефинише методе потребне за припрему података и извршавање евалуације. Руковаоци имплементирају ову спрегу за појединачне аудио технологије и реализују одговарајућу логику евалуације. Резултат евалуације добија се поређењем излазног и референтног вектора уз помоћ одговарајућег алата за евалуацију, након чега се утврђује испуњеност дефинисаног критеријума. Компонента за генерисање извештаја задужена је за евидентирање и форматирање резултата евалуације.

Табела 1. Имплементиране крајње тачке и њихове намене

Крајња тачка	Намена
POST /connect	Успостављање сесије
POST /transfer	Покретање преноса података
POST /evaluate	Покретање евалуације
POST /disconnect	Затварање сесије

5. МЕРЕЊА И РЕЗУЛТАТИ

За потребе испитивања евалуационог радног оквира коришћена је DSP развојна платформа CRD49844 са DSP CS49844 и RT-AG аудио картица које приказује слика 4. [7, 8]. Централна компонента система је DSP развојна платформа која је задужена за обраду дигиталног звука. RT-AG аудио картица користи се за прослеђивање улазног аудио сигнала од рачунара ка уређају који се испитује, као и за снимање излазног аудио сигнала са уређаја који се испитује.



Слика 4. CRD49844 DSP развојна платформа и RT-AG аудио картица

5.1. Методологија мерења

У циљу процене перформанси предложеног решења, спроведена су мерења укупног времена извршавања тестног плана и евалуације резултата, означеног са *T*. Поред укупног времена, у референтној конфигурацији су мерене и временске компоненте *Tm* (време извршавања тестова) и *Te* (време евалуације), које су коришћене као основа за анализу осталих конфигурација. Испитивање је спроведено у четири конфигурације система ради поређења утицаја издвајања процеса евалуације, мрежне комуникације и

Табела 2. Преглед кључних карактеристика посматраних конфигурација

Конфигурација	Инстанце униформног извршиоца	Евалуација	Режим рада	Мрежна комуникација	Паралелно извршавање тестова
1 (референтна)	1	у оквиру униформног извршиоца тестова	локални	не	не
2	1	евалуациони радни оквир	локални	не	не
3	1	евалуациони радни оквир	удаљени	да	не
4	2	евалуациони радни оквир	комбинација локалног и удаљеног	да	да

паралелног извршавања тестова на укупно време извршавања. Укупно време извршавања сваке конфигурције, као и време извршавања тестова и време евалуације, одређени су на основу једног мерења. Табела 2. даје преглед кључних карактеристика сваке конфигурације.

За потребе мерења коришћене су две аудио технологије, означене као Технологија А и Технологија Б, са 1266 односно 225 тестних случајева. Тестни случајеви покривају различите функционалности и сценарије обраде звука дефинисане у референтним пакетима технологија. Иако обе технологије користе сличан процес извршавања тестова, евалуација њихових резултата заснива се на различитим алатима и критеријумима, чиме се омогућава анализа флексибилности интеграције различитих евалуационих процедура у оквиру система.

5.2. Резултати и анализа

Анализа је започета референтном конфигурацијом, у којој су независно мерени време извршавања тестова Тт и време евалуације Те. Укупно време извршавања дефинисано је као њихов збир (1):

$$T = Tm + Te \quad (1)$$

Табела 3. приказује резултате мерења у референтној конфигурацији система.

Табела 3. Резултати мерења у референтној конфигурацији система

Метрика	Технологија А	Технологија Б
Tm – време извршавања тестова	24.09	1.3
Te – време евалуације резултата	0.98	0.02
T – укупно време извршавања	25.07	1.32

На основу приказаних резултата може се уочити да време извршавања тестова *Tm* доминира у укупном времену извршавања система *T*, док време евалуације *Te* у мањој мери утиче на укупно време *T*.

Табела 4. приказује укупно време извршавања у свим конфигурацијама за технологију А, док Табела 5. приказује одговарајуће резултате за Технологију Б.

Табела 4. Укупно време извршавања у свим конфигурацијама за Технологију А

Конфигурација	Опис	Укупно време извршавања Т (изражено у сатима) за Технологију А
1	референтна	25.07
2	локални режим	24.12
3	удаљени режим	24.04
4	комбиновани локални и удаљени режим	12.3

Табела 5. Укупно време извршавања у свим конфигурацијама за Технологију Б

Конфигурација	Опис	Укупно време извршавања Т (изражено у сатима) за Технологију Б
1	референтна	1.3
2	локални режим	1.29
3	удаљени режим	1.3
4	комбиновани локални и удаљени режим	0.66

Поређењем резултата може се уочити да издвајање процеса евалуације (конфигурација 2) доводи до смањења укупног времена извршавања *T*, јер се евалуација извршава паралелно са извршавањем тестова. Остварено убрзање зависи од односа времена извршавања тестова *Tm* и времена евалуације *Te*, при чему је ефекат израженији код Технологије А због дужег времена евалуације. Анализом конфигурације са удаљеним извршавањем (конфигурација 3) може се

уочити да је утицај мрежне комуникације на укупно време извршавања занемарљив, јер одступања у укупном времену извршавања у односу на конфигурацију 2 не прелазе 1%. Највеће убрзање остварено је у конфигурацији 4, где је применом дисрибуираног извршавања тестни план подељен на две инстанце, што је довело до приближно двоструког смањења времена извршавања.
Резултати показују да предложена архитектура омогућава ефикасно раздвајање извршавања тестова и евалуације, уз добру скалабилност у случају дистрибуираног извршавања, при чему евалуациони радни оквир не представља уско грло система.

6. ЗАКЉУЧАК

У оквиру овог рада предложен је евалуациони радни оквир интегрисан са постојећим униформним оквиром, који омогућава раздвајање извршавања тестова и евалуације, као и једноставну интеграцију различитих евалуационих процедура.
Резултати потврђују да издвајање евалуације и њено извршавање на удаљеној машини имају мали утицај на укупно време, док паралелно извршавање тестова значајно убрзава систем. Остварено убрзање зависи од односа времена извршавања тестова и евалуације.
Добијени резултати потврђују да предложени приступ представља добру основу за аутоматизацију процеса евалуације у испитивању уграђених аудио система. Будући развој може бити усмерен ка испитивању већег броја аудио технологија, анализи рада система у окружењима са већим бројем извршних чворова и додатном унапређењу механизма за расподелу и извршавање тестова.

7. ЛИТЕРАТУРА

[1] P. Liggesmeyer and M. Trapp, "Trends in Embedded Software Engineering," in IEEE Software, vol. 26, no. 3, pp. 19-25, May-June 2009.

[2] T. Novković, “Metodologija razvoja uniformnog okvira za ispitivanje ugrađenih audio sistema,” PhD. dissertation, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia, 2024.

[3] J. Kovacevic, U. Radujko, M. Djukic, T. Novkovic, „Smart Multi-Agent Framework for Automated Audio Testing,“ Elektronika Ir Elektrotechnika, т. 29(1), pp. 59-68, 2023.

[4] E. Dustin, J. Rashka, J. Paul, “Automated Software Testing: Introduction, Management, and Performance,” Addison-Wesley Professional, 2008.

[5] A. S. Tanenbaum and M. van Steen, “Distributed Systems: Principles and Paradigms,” 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Prentice Hall, 2007.

[6] R. T. Fielding, “Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures,” Doctoral dissertation, University of California, Irvine, 2000.

[7] C. L. Corporation, „CS49834/44 description page,“ https://www.cirrus.com/products/cs49834-44/ (приступљено 15.6.2026.)

[8] N. Pekez, N. Kaprocki and J. Kovačević, "Implementation of PC Application for Controlling RT-AG External Sound Card," 2018 Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC), Novi Sad, Serbia, 2018.

Кратка биографија:



Милица Тадић рођена је у Сремској Митровици 2000. године. Дипломски рад на Факултету техничких наука из области Рачунарска техника и рачунарске комуникације одбранила је 2023. године.
Контакт: milica.tadic@uns.ac.rs



Јелена Ковачевић рођена је у Београду 1973. године. Докторску дисертацију на Факултету техничких наука из области Рачунарска техника и рачунарске комуникације одбранила је 2010. године.
Контакт: jelena.kovacevic@uns.ac.rs

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 4.3
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36BE57Petrovic

Имплементација подршке MIPS32 архитектуре у Dart SDK и Flutter окружењу

Implementation of MIPS32 architecture support in Dart SDK and Flutter framework

Славиша Петровић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – РАЧУНАРСТВО И АУТОМАТИКА

Кратак садржај - *У овом раду описана је имплементација подршке MIPS32 процесорске архитектуре у Dart SDK и Flutter окружењу. Теоријски део обухвата архитектуру Dart виртуелне машине, моделе извршавања (JIT и AOT), управљање меморијом, као и MIPS32 архитектуру, њен инструкцијски скуп и бинарни интерфејс апликације (ABI). Имплементациони део описује све кључне компоненте позадинског слоја преводиоца: асемблер за MIPS32 инструкцијски скуп, распоред стек оквира, позадински слој међурепрезентације са имплементацијама аритметичких и управљачких операција, координатор превођења и потпрограми извршног система. Поред Dart VM позадинског дела, описане су и измене у систему за изградњу Flutter engine-а.*

Кључне речи: *Dart SDK, Flutter, Flutter engine, компајлер, MIPS32*

Abstract – *This paper describes the implementation of MIPS32 processor architecture support in the Dart SDK and Flutter framework. The theoretical section covers the Dart virtual machine architecture, execution models (JIT and AOT), memory management, as well as the MIPS32 architecture, its instruction set, and application binary interface (ABI). The implementation section describes all key components of the compiler backend: the assembler for the MIPS32 instruction set, stack frame layout, the IL backend with implementations of arithmetic and control flow operations, the compilation coordinator, and runtime stubs. In addition to the Dart VM backend, the paper also covers the changes made to the Flutter engine build system.*

Keywords: *Dart SDK, Flutter, Flutter engine, compiler, MIPS32*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био проф. др Иван Каштелан.

1. УВОД

Експанзија уређаја заснованих на различитим процесорским архитектурама, од мобилних уређаја и таблета до уграђених система у индустријским постројењима и потрошачкој електроници, довела је до ситуације у којој је подршка за више платформи постала незаобилазна. У том контексту, Flutter се наметнуо као један од водећих вишеплатформских развојних оквира. Развијен од компаније Google, Flutter омогућава писање апликација које се потом могу покренути на различитим оперативним системима као што су Android, iOS, Linux, macOS и Windows, захваљујући сопственом механизму рендеровања који не зависи од уграђених графичких компоненти оперативног система [1].

Програмски језик који стоји у основи Flutter екосистема је Dart, статички типизиран, објектно оријентисан језик, такође развијен од стране компаније Google. Dart се преводи директно у машински код за циљну платформу, што осигурава задовољавајући ниво перформанси како у фази развоја (JIT), тако и у продукцији (AOT). Упркос овим предностима, екосистем Flutter-а и Dart-а карактерисала је једна значајна празнина: одсуство подршке за MIPS32 процесорску архитектуру [2, 3].

MIPS32 је архитектура редукованог скупа инструкција (RISC) присутна деценијама у уграђеним системима широм света. Милиони уређаја заснованих на MIPS32 процесорима, као што су кабловски и сателитски телевизијски пријемници, мрежни рутери и индустријски контролери, и данас су активно у употреби. Dart SDK је поседовао основну подршку за MIPS32 све до 2017. године, када је компанија Google одлучила да обустави њено даље одржавање. Последица је била искљученост читавог екосистема модерних Flutter апликација за MIPS платформу.

Циљ овог рада је да премости ту празнину, да MIPS32 архитектура поново буде равноправна циљна платформа у Dart SDK, и да се тиме отвори пут ка покретању Flutter апликација на уређајима који су до сада били искључени из тог екосистема. Поред академског доприноса, рад има и непосредну практичну вредност за компаније које развијају и одржавају софтвер за MIPS32 уређаје [3].

2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ

2.1. Dart виртуелна машина и модели извршавања

Dart VM (Virtual Machine) није виртуелна машина у класичном смислу речи. Dart код се не извршава тумачењем међукода као у Javi, него се преводи у

машински код и извршава директно на процесору. Термин "виртуелна машина" овде означава скуп компоненти које заједно омогућавају извршавање Dart програма: компајлере, управљање меморијом и систем за подршку током рада програма [2, 4].

Dart VM подржава два основна модела извршавања. JIT (Just-in-Time) превод се користи током развоја апликације и омогућава превод кода у тренутку извршавања, што допушта брзо тестирање промена без поновног покретања апликације (hot reload). AOT (Ahead-of-Time) превод се користи у продукцијским окружењима где се цео програм унапред преводи у машински код, што доноси брже покретање и боље перформансе. Кључна компонента AOT компајлера је анализа тока типова (TFA), која прегледа цео програм и утврђује које делове кода програм заиста може да позове, што компајлеру омогућава да уклони непотребни код [4, 5].

Dart VM имплементира генерацијски сакупљач смећа који се заснива на хипотези да већина објеката кратко живи. Heap је подељен на млађу генерацију за новоалоциране објекте и стару генерацију за објекте дугог животног века. VM користи и технику "write barriers" за праћење референци из старе у младу генерацију, што омогућава ефикасно парцијално скупљање без скенирања целог heap-а.

2.2. Flutter архитектура и embedder

Flutter је дизајниран као проширив, слојевити систем. Централна апстракција су widget-и, непроменљиви описи делова корисничког интерфејса, који се комбинују у стабло. Flutter користи три међусобно усклађена стабла: widget tree, element tree, render tree. Сваки фрејм који Flutter прикаже пролази кроз дефинисани "rendering pipeline" који обухвата фазе изградње, распореда, цртања, композиције и растеризације.

Flutter Engine је срце система, писан претежно у C++ програмском језику, који обезбеђује све услуге ниског нивоа: графичко рендеровање (Skia/Impeller), текстуалну подршку, Dart извршни систем и управљање ресурсима. Engine комуницира са оперативним системом кроз тзв. embedder слој, платформски специфичну компоненту која имплементира јавни Flutter Embedder API. Управо ова архитектура омогућава портовање Flutter-а на нову платформу имплементацијом релативно танког embedder слоја, без потребе за модификовањем самог engine кода или Flutter окружења. За уграђене Linux системе користи се пројекат flutter-embedded-linux, који има минималну зависност од системских библиотека и подржава више позадинских слојева за приказ [1, 6].

2.3. MIPS32 процесорска архитектура

MIPS32 је архитектура редукованог скупа инструкција (RISC) са 32 регистра опште намене ширине 32 бита. Све инструкције имају фиксну дужину од 32 бита и сврставају се у један од три основна формата: R тип (регистарски), I тип (непосредни операнд) и J тип (скок). Архитектура користи O32 бинарни интерфејс апликације (ABI), по коме се аргументи прослеђују у регистрима A0-A3, а вредности враћају у V0-V1. Регистри S0-S7 су callee-saved и морају бити очувани кроз позиве функција [7, 8].

Специфичност која директно утиче на имплементацију преводиоца је механизам одложеног извршавања (delay slot). Када процесор наиђе на инструкцију гранања, инструкција која се физички налази одмах после ње у меморији увек се извршава. Ова инструкција се назива "слот кашњења". MIPS32 такође нема посебан регистар стања (Status Register) какав постоји на ARM или x86 архитектури. Поређења се врше експлицитним инструкцијама које резултат уписују у регистар опште намене [7].

Као хардверска платформа за верификацију коришћена је развојна плоча MIPS Creator CI20 (MIPS32r2 1,2 GHz, 1 GB RAM, Debian Linux за MIPS little-endian). Поред физичке плоче, у свакодневном развоју коришћен је QEMU емулатор који подржава MIPSEL (MIPS little-endian) [9, 10].

3. ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА

Преношење компајлера на нову архитектуру није тривијална измена, него скуп међусобно зависних компоненти које заједно чине потпун позадински слој (backend). Dart VM компајлер је дизајниран са јасним раздвајањем архитектурно независног и зависног дела. Све што је специфично за циљну архитектуру смешта се у скуп датотека са суфиксом _mips. Имплементација је заснована на три ослонца: делимични порт из 2017. године, референтна 32-битна ARM имплементација (која дели специфичности са MIPS32 у погледу адресног простора и конвенције позива), и код писан од нуле за специфичности MIPS ISA.

3.1. Регистарски модел и конвенције позива

Сваки део компајлерског позадинског слоја ради са симболичким именима регистара, а не са бројевима. MIPS32 архитектура има 32 целобројна регистра опште намене (R0-R31) и 32 регистра са покретним зарезом (F0-F31). Имплементација почиње дефинисањем ових скупова у датотеци constant_mips.h. Поред набројивог типа Register, овај фајл дефинише и скупове регистара изражене као 32-битне маске типа RegList, којима алокатор регистара зна које регистре сме слободно да употреби, које мора да сачува и које треба у потпуности да избегне.

Dart VM резервише одређене регистре за интерне потребе (Dart специфични алијаси). Одлуке о додели биле су условљене O32 ABI. Dart регистри морају бити сачувани кроз C позиве (callee-saved), јер виртуелна машина позива C++ извршни систем и очекује да им вредности остану нетакнуте по повратку. Тако је THR (показивач на текућу нит) додељен S3, PP (показивач на object pool) додељен S7, а CODE_REG (показивач на текући објекат кода) додељен S6.

MIPS32 не поседује посебан регистар стања какав постоји на ARM или x86. То значи да тип Condition не представља бит у хардверском регистру стања, него апстрактну вредност (enum) коју чвор међурепрезентације носи уз себе. Асемблер ту

вредност разрешава у конкретну секвенцу инструкција приликом емитовања.

3.2. Имплементација асемблера

Асемблер у контексту Dart VM није засебан алат, него C++ класа која излаже методе за емитовање MIPS инструкција директно у меморијски бафер. MIPS32 скуп инструкција дефинише три основна формата, па асемблер имплементира одговарајуће методе EmitRType, EmitIType и EmitJType које примају симболичке аргументе и уграђују их у 32-битну реч у складу са MIPS32 стандардом. Сваки позив методе Emit уписује тачно четири бајта у бафер и ажурира стање механизма одложеног извршавања.

Механизам одложеног извршавања (delay slot) директна је последица проточне архитектуре MIPS32 процесора. Асемблер излаже механизам delay_slot() којим позивалац може да одложени слот попуни корисном инструкцијом уместо NOP инструкцијом, чиме се избегава губитак процесорског циклуса при сваком гранању. Стање механизма прати се кроз два поља: delay_slot_available_ (поставља се одмах након слања гранајуће инструкције) и in_delay_slot_ (поставља се током уписа инструкције у одложени слот). Сваки позив Emit ресетује оба поља, спречавајући ненамерно уписивање.

Све MIPS инструкције I типа располажу само 16-битним пољем за непосредни операнд. Учитавање произвољне 32-битне вредности захтева две инструкције: lui (пуни горњих 16 бита) и ori (пуни доњих 16 бита). Метода LoadImmediate ову секвенцу оптимизује. Вредности које стају у 16 бита решава једном addiu инструкцијом, а када су доњих 16 бита нула, ori се изоставља. За дугачке скокове чији помак не стаје у 16-битно поље MIPS условних грана, користи се механизам “far branches”. Инвертована грана прескаче блок за безусловни скок, а циљна адреса се учитава у регистар T9 путем lui/ori пара. Избор T9 није случајан; O32 конвенција захтева да T9 увек садржи адресу одредишне функције.

3.3. Распоред стек оквира и координатор превођења

Свака Dart функција почиње успостављањем стек оквира. Метода EnterDartFrame чува четири речи на стеку (RA, FP, CODE_REG, PP), поставља нови FP и резервише простор за локалне променљиве. Распоред је дефинисан константама у stack_frame_mips.h које изражавају офсете у бајтовима релативно на FP регистар. Свака промена распореда у EnterDartFrame мора бити праћена одговарајућом променом константи, јер их сакупљач смећа и деоптимизатор читају независно један од другог.

Датотека flow_graph_compiler_mips.cc имплементира координатора који пролази кроз граф међурепрезентације и на свакој инструкцији позива EmitNativeCode.

За сваку тачку деоптимизације у оптимизованом коду, CreateDeoptInfo бележи комплетно виртуално стање оквира у формату који извршни систем користи да реконструише неоптимизовани оквир. При деоптимизацији, извршни систем чита ову табелу и изграђује неоптимизовани стек оквир пре наставка извршавања кроз секвенцу извршних потпрограма (runtime stubs).

3.4. Позадински слој међурепрезентације

Датотека il_mips.cc имплементира архитектурно специфичан део преводиоца који сваки чвор међурепрезентације преводи у конкретне MIPS32 инструкције. Сваки чвор имплементира две методе: MakeLocationSummary (декларише захтеве чвора за регистрима у првом пролазу, пре алокације) и EmitNativeCode (емитује стварни машински код користећи регистре које је алокатор доделио у другом пролазу). Ово раздвајање је кључно за преносивост, алокатор регистара не зна ништа о MIPS32, већ ради са апстрактним захтевима.

MIPS32 R тип инструкције су тро-операндне: addu rd, rs, rt што значи да резултати иду у rd без измене улазних операнада. Ова особина је експлицитно искоришћена у MakeLocationSummary за BinarySmiOpInstr: излаз може бити трећи, независни регистар, што елиминише непотребне mov инструкције. Најсложенији случај је множење. MIPS32 нема инструкцију која чува 32-битни резултат у једном регистру опште намене. Инструкција mult rs, rt израчунава 64-битни производ и смешта га у специјални пар HI:LO, а једини начин приступа је кроз mflo и mfhi инструкције.

3.5. Имплементација у Flutter окружењу

Само присуство MIPS позадинског слоја у Dart VM није довољно да Flutter апликација може бити изграђена и покренута на MIPS уређају. Неопходно је и да Flutter окружење буде правилно конфигурисано за MIPS на нивоу система за изградњу. Flutter engine се гради као динамичка библиотека libflutter_engine.so која садржи и Dart VM преведен за циљну архитектуру. Кључна GN променљива dart_target_arch мора бити експлицитно постављена на “mips”, јер назив који GN користи за MIPS little-endian (mipsel) не одговара директно имену које Dart SDK користи.

Централна измена у скрипти за конфигурацију Flutter engine-а била је додавање mipsel као дозвољене вредности за аргумент --linux-cpu, као и експлицитно постављање dart_target_arch на “mips”. Без ове корекције, систем за изградњу не би пронашао исправне изворне фајлове као што су il_mips.cc. Измене су биле потребне и у fml/build_config.h као и tonic/build_config.h фајловима, који дефинишу макрое за детекцију циљне платформе. Без одговарајућег блока за MIPS детекцију, преводилац би прескочио MIPS грану и оставио кључне променљиве архитектуре недефинисаним, узрокујући грешке у току превођења.

4. ВЕРИФИКАЦИЈА И РЕЗУЛТАТИ

Dart SDK садржи свеобухватан скуп тестова у директоријуму tests/ организованих по слојевима система. Скуп тестова обухвата неколико категорија: language/ тестови (4724 фајла) проверавају

спецификацију Dart језика укључујући типове, контролу тока, асинхроне конструкције и генеричке типове; corelib/ тестови (око 440 фајлова) покривају стандардне библиотеке попут dart::core и dart::collection; ffi/ тестови (око 200 фајлова) верификују позивање C функција и прослеђивање структура, чиме директно проверавају исправност O32 ABI имплементације; standalone/ тестови (око 480 фајлова) проверавају изолате и управљање процесима; док vm/ тестови укључују C++ тестове интерних механизама попут асемблера, алокатора објеката и сакупљача смећа, као и Dart тестове напредних JIT сценарија попут деоптимизације. Тестови су покренути на скупу од преко 12.500 конфигурација.

Коначно стање имплементације, мерено на том скупу, приказано је у Табели 1. Као референца коришћена је ARM имплементација, Табела 2.

Табела 1. Резултати MIPS32 имплементације

	Пролаз	Пад	Успешност
Release	12536	130	98,97%
Debug	12522	150	98,82%

Табела 2. Резултати ARM32 референтне имплементације

	Пролаз	Пад	Успешност
Release	12623	107	99,16%
Debug	12605	111	99,13%

Разлика између MIPS32 release конфигурације (130 палих тестова) и ARM имплементације (107 палих тестова) износи свега 23 теста, што представља разлику мању од 0,2% у укупном скупу. Ниједан од преосталих падова не указује на грешку у генерисању кода за аритметику, контролу тока или управљање меморијом, што су критични предуслови за функционалан JIT преводилац.

Поред аутоматизованих тестова, верификација је спроведена и на физичкој MIPS Creator CI20 плочи. Више Flutter апликација покренуто је директно на хардверу: основна “hello_world” апликација која исписује текст, стандардна “flutter create” демо апликација, као и пример који приказује нативне текстуре унутар Flutter UI-а. Све приказане апликације покренуте су без модификација изворног кода.

5. ЗАКЉУЧАК

У овом раду описана је имплементација подршке MIPS32 процесорске архитектуре у Dart SDK и Flutter окружењу. Поред Dart VM, описане су и неопходне измене у Flutter engine систему за изградњу.

Посматрано из перспективе крајњег корисника, резултат је конкретан и одмах употребљив. Програмер који развија Flutter апликацију за модерни мобилни уређај може ту исту апликацију превести и покренути на MIPS платформи без измене иједне линије свог апликативног кода. Верификација на скупу од преко 12.500 тестова показује стопу успешности од 98,97% у release конфигурацији, што је мање од 0,2% испод референтне ARM имплементације. Успешно покретање више Flutter примера на физичкој MIPS Creator CI20 плочи потврђује функционалан “end-to-end” ток од Dart изворног кода до пиксела на екрану.

Имплементација приказана у овом раду није замишљена као изолована грана, већ као основа за интеграцију у званичну Google грану.

Овим радом је показано да MIPS архитектура, упркос томе што је често занемарена у контексту савременог мобилног развоја, није техничка препрека за покретање Flutter апликација; препрека је била једино одсуство имплементације.

6. ЛИТЕРАТУРА

[1] Flutter Team, Google. “Flutter Architectural Overview.” [Online]. Доступно: https://docs.flutter.dev/resources/architectural-overview. (приступљено у априлу 2026.).

[2] V. Egorov. “Dart VM Internals.” [Online]. Доступно: https://mrale.ph/dartvm. (приступљено у априлу 2026.).

[3] Dart Team, Google. “Dart SDK.” GitHub. [Online]. Доступно: https://github.com/dart-lang/sdk. (приступљено у априлу 2026.).

[4] V. Egorov. “Introduction to Dart VM.” [Online]. Доступно: https://plugfox.dev/introduction-to-dart-vm/. (приступљено у априлу 2026.).

[5] Dart Team, Google. “Dart Overview.” [Online]. Доступно: https://dart.dev/overview. (приступљено у априлу 2026.).

[6] Sony Group Corporation. “flutter-embedded-linux.” GitHub. [Online]. Доступно: https://github.com/sony/flutter-embedded-linux. (приступљено у априлу 2026.).

[7] MIPS Technologies, Inc. MIPS32 Architecture Reference Manual, Rev. 5.03. MIPS Technologies, Inc., 2016.

[8] Linux Foundation. “System V ABI – MIPS RISC Processor Supplement,” 3rd ed. [Online]. Доступно: https://refspecs.linuxfoundation.org/elf/mipsabi.pdf. (приступљено у априлу 2026.).

[9] eLinux.org. “CI20 Hardware Specifications.” [Online]. Доступно: https://elinux.org/CI20_Hardware. (приступљено у априлу 2026.).

[10] eLinux.org. “MIPS Creator CI20.” [Online]. Доступно: https://elinux.org/MIPS_Creator_CI20. (приступљено у априлу 2026.).

Кратка биографија:

Славиша Петровић рођен је у Лозници 2001. године. Дипломске студије на Факултету техничких наука у Новом Саду из области Електротехнике и рачунарства завршио је 2024. године.

Контакт: petrovicslavisa96@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, НовиСад

УДК: 621.38
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36BE58Goronic

Преслушавање између паралелних проводника

Crosstalk Between Parallel Conductors

Дања Горонић, Калман Бабковић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОНИКА И ТЕЛЕКОМУНИКАЦИЈЕ

Кратак садржај – *У овом раду извршена су експериментална испитивања капацитивног преслушавања између два паралелна проводника. Циљ мјерења је утврђивање утицаја фреквенције сигнала, међусобног растојања проводника и оптерећења на ниво преслушавања. Резултати добијени мјерењем помоћу осцилоскопа и спектралног анализатора упоређени су са теоријским прорачунима и симулацијама у програму MicroCap, како би се испитала усклађеност реалног и идеалног модела система.,*
Кључне речи: *EMI, EMC, капацитивна спрега, преслушавање, MicroCap*

Abstract – *In this paper, experimental investigations of capacitive crosstalk between two parallel conductors were carried out. The aim of the measurements is to determine the influence of signal frequency, mutual conductor spacing, and load on the level of crosstalk. The results obtained by measurements using an oscilloscope and a spectrum analyzer were compared with theoretical calculations and simulations in the MicroCap software, in order to examine the agreement between the real and ideal system models*

Keywords: *EMI, EMC, capacitive coupling, crosstalk, MicroCap*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Калман Бабковић, ванредни професор.

1. УВОД

У савременим електронским системима, поузданост и интегритет сигнала постали су један од кључних захтијева у дизајну и развоју уређаја. Како технологија напредује, електронске компоненте постају све мање, брже и сложеније, што доводи до повећања густине компоненти на штампаним плочама и пораста радних фреквенција. Због тога електромагнетска компатибилност (EMC) добија све већи значај, јер чак и мали поремећаји у електромагнетском окружењу могу довести до деградације перформанси, нестабилности система или потпуног квара уређаја. Због повећања сложености савремених електронских уређаја, повећава се и значај разумјевања паразитних ефеката који могу нарушити правилан рад система. Један од најзначајнијих феномена који се јавља јесте *преслушавање (енг. crosstalk)*. У овом раду акценат је стављен на испитивање преслушавања, са циљем идентификације механизама капацитивног спрезања између проводника. Поред анализе спрезања између бакарних проводника, посебно се разматра утицај различитих услова и просторних конфигурација на ниво преслушавања.

1.1. Основни појмови

Електромагнетска компатибилност (EMC) представља способност електронског уређаја или система да правилно функционише у свом електромагнетском окружењу, без изазивања електромагнетских сметњи другим уређајима и без деградације сопствених перформанси. EMC се бави генерисањем, преносом и пријемом електромагнетне енергије. Ова три аспекта EMC проблема чине основну структуру сваког EMC дизајна [1].
Појам EMI (енг. Electromagnetic Interference), односи се на нежељене сигнале или шумове изазване електромагнетским изворима, који нарушавају рад електронских система. EMI може потицати из самог уређаја или из околних система, и у оба случаја ремети редован рад.
Када један електрични круг утиче на други, та појава се назива спрезање (енг. coupling). Ово је кључан концепт за разумијевање преслушавања. Према путањама преноса EMI, методе преноса се дијеле на четири типа:

1. Спрега путем заједничке импедансе;
2. Капацитивна спрега;
3. Индуктивна спрега;
4. Радијациона спрега ;

Crosstalk (или X-talk) је феномен када сигнал на једном проводнику изазове шум на сусједном проводнику. Проводник који шаље сигнал и изазива шум назива се агресор, док се проводник који прима шум назива жртва. Постоје двије главне категорије crosstalk-а: сигнални и преклопни шум. Постоје двије локације на којима посматрамо и дефинишемо преслушавање: блиски крај (локација најближа извору) и далеки крај (локација најближа пријемнику сигнала).
Капацитивно преслушавање је појава када сигнал на једном проводнику ствара нежељени напон или струју на сусједном проводнику због међусобне капацитивности.

Када ивица сигнала агресора путује низ проводник, она убризгава струју у проводник жртве кроз међусобну капацитивност (енг. Mutual Capacitance, C_m). Струја која се убризгава дата је изразом:

$$I_c = C_m \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

I_c - струја која се убризгава у жртву [A];
C_m - међусобна капацитивност између агресорског и жртвеног проводника [F];
$\frac{dV}{dt}$ - брзина промјене напона на агресорском проводнику [V/s];

Струја која се убризгава (1) види једнаку импедансу у оба правца, па половина струје иде напријед, а половина назад.

1.2. Уређаји

Уређаји коришћени током реализације експерименталних мјерења су:

1. Siglent SDG1032X
Генератор функција Siglent SDG1032X коришћен је за генерисање синусног побудног сигнала у фреквенцијском опсегу од 100 Hz до 25 MHz.

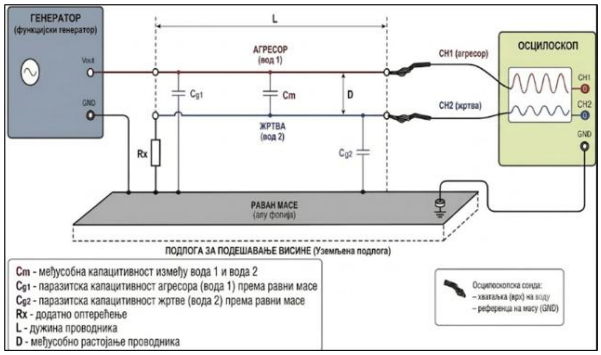
2. Дигитални осцилоскоп
Дигитални осцилоскоп Siglent SDS-1102CML+ коришћен је за посматрање и анализу сигнала током експерименталних мјерења.

3. Спектрални анализатор
Спектрални анализатор Siglent SVA1032X са уграђеним tracking generator-ом коришћен је за анализу фреквенцијског одзива и мјерење слабљења и преслушавања.

4. Претпојачавач PA303
Претпојачавач PA303 коришћен је за појачање слабих сигнала и повећање осјетљивости мјерног система.

2. ПОСТАВКА ЕКСПЕРИМЕНТА

У овом поглављу биће приказан начин реализација експеримента (*Слика 2.1*). Компоненте које су биле неопходне за рад јесу бакарни проводници. Раван масе реализована је помоћу алу фолије, а као одстојник је коришћен стиропор.



Слика 2.1 Поставка експеримента

Мјерења су изведена помоћу двоканалног осцилоскопа, функцијског генератора и спектралног анализатора. Постављањем два проводника паралелно добијамо могућност за испитивање феномена преслушавања. Функцијски генератор генерише простопериодични синусни сигнал на страни агресора. Капацитивно преслушавање настаје усљед нежељеног капацитивног спрезања између проводника. Капацитивности које се при томе јављају јесу међусобна капацитивност [2] и капацитивност проводника ка маси [3]. За два паралелна цилиндрична проводника, међусобна капацитивност по јединици дужине је:

$$C'_M \approx \frac{\pi\varepsilon_0}{\cosh^{-1}\left(\frac{D}{2r}\right)}\left[\frac{F}{m}\right] \quad (2)$$

ε_0 - пермитивност вакуума ($8.854 \cdot 10^{-12}$ $[\frac{\mathrm{F}}{\mathrm{m}}]$);
π - математичка константа ($\pi \approx 3{,}14$);
D - растојање између центара два проводника;
r - полупречник проводника;

Капацитивност проводника ка маси по јединици дужине добија се формулом:

$$C'_g \approx \frac{\pi\varepsilon}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)}\left[\frac{F}{m}\right] \quad (3)$$

ε – пермитивност средине између проводника и масе ($\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$);
ε_0-пермитивност вакуума ($8.854 \cdot 10^{-12}$ $[\frac{F}{m}]$);
ε_r-релативна пермитивност средине (ваздух ≈ 1);
π - математичка константа ($\pi \approx 3{,}14$);
h – висина проводника изнад масе;
r– полупречник проводника;

Током генерисања сигнала, одзиви на проводницима, агресору и жртви, се прате и приказују на осцилоскопу помоћу сонди.

3. МЈЕРЕЊА НА НИСКИМ ФРЕКВЕНЦИЈАМА

Први случај који ће бити анализиран реализован је постављањем проводника на 3D чешљиће, са међусобним растојањем од 4mm и са одстојањем 1cm изнад масе (*Слика 3.1*). Полупречник проводника је 0.625 mm, а дужина је иста и износи 0.5 m.


Слика 3.1 Поставка проводника на међусобном растојању 4mm

Резултати мјерења на различитим фреквенцијама приказани су у *Табели 1*.

Табела 1. Приказ резултата мјерења међусобног растојања 4мм

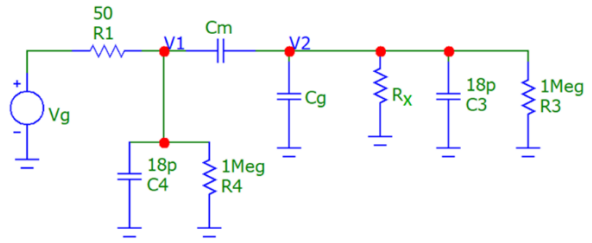
f(kHz)	1K	5K	10K	50K	100K	500K	1M	5M	10M	15M	25M
d = 4mm											
V1 =	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	1	1	1.08	1.36	1.98	1.48
V2 =	0.0048	0.0208	0.0408	0.142	0.172	0.196	0.196	0.218	0.29	0.38	0.276
V2/V1]db	-46.1997	-33.4633	-27.6113	-16.7788	-15.114	-14.1549	-14.1549	-13.8993	-13.4228	-14.3376	-14.5871

Из приказане табеле се уочава да са порастом фреквенције побудног сигнала долази до повећања преслушавања, односно смањења слабљења између агресора и жртве. Однос између напона изражен у децибелима постаје мање негативан при вишим фреквенцијама. Међусобна капацитивност између два паралелна проводника (Cm) представља реактивни елемент чија се импеданса смањује са порастом фреквенције :

$$Xc = \frac{1}{2\pi f Cm} \qquad (4)$$

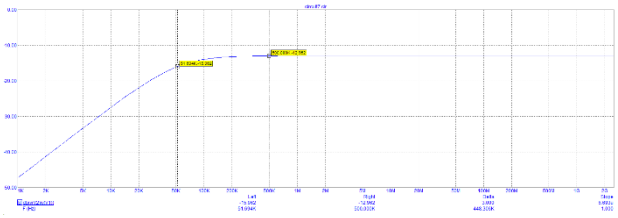
Xc — капацитивна реактанса [Ω];
f — фреквенција сигнала [Hz];
π — математичка константа ($\pi \approx 3{,}14$);
Cm — међусобна капацитивност између проводника [F] [4];

Анализом израза (4) може се закључити да је на нижим фреквенцијама капацитивна реактанса велика, због чега је капацитивна спрега слаба, што резултује израженим слабљењем сигнала. Са порастом фреквенције реактанса опада, што доводи до јачег електричног спрезања и већег преноса сметње. Теоријски осврт се поклапа са резултатима добијеним мјерењима. На *Слици 3.2* приказан је модел система са сконцентрисаним параметрима, при чему је побуда која је доведена са функцијског генератора представљена напонским изворот Vg, те 50-омским оптерећењем које генератор посједује. Чворови V1 и V2 представљају проводнике са којих се хвата сигнал помоћу осцилоскопа, због чега им се додаје отпорност 1MΩ, као и капацитивност од 18pF. Поред тога, између проводника појављује се међусобна капацитивност, као и капацитивност проводника ка маси. AC анализом у Micro-Cap-у однос напона V_2/V_1 приказује се у децибелима као функција фреквенције, чиме се директно анализира фреквенцијска зависност преслушавања у колу.

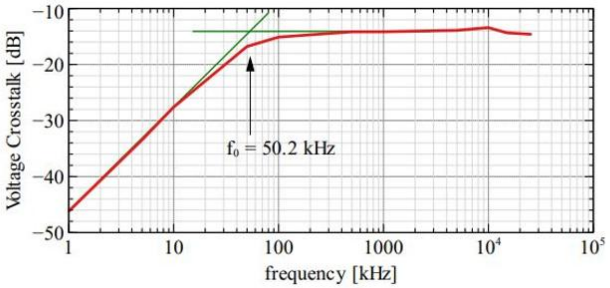


Слика 3.2 Модел испитиваног система представљен у Micro Cap-у

Овом методом лако се визуализују промјене кроз читав фреквенцијски опсег (*Слика 3.3*), што пружа јасан увид у динамику сигнала. У области ниских фреквенција напон је директно пропорционалан фреквенцији, због чега преслушавање константно расте са нагибом од 20dB по декади. У овом опсегу отпорност има доминантан утицај, док је управо због поменуте велике капацитивне реактансе струја кроз паразитну капацитивност ограничена, што за посљедицу има релативно низак индуковани напон.



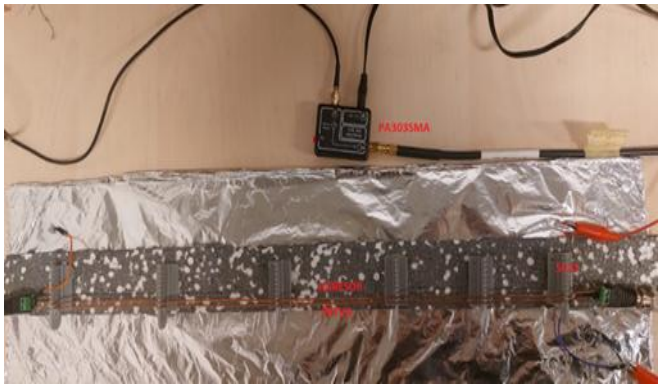
Слика 3.3 Приказ карактеристике добијене у Micro Cap-у



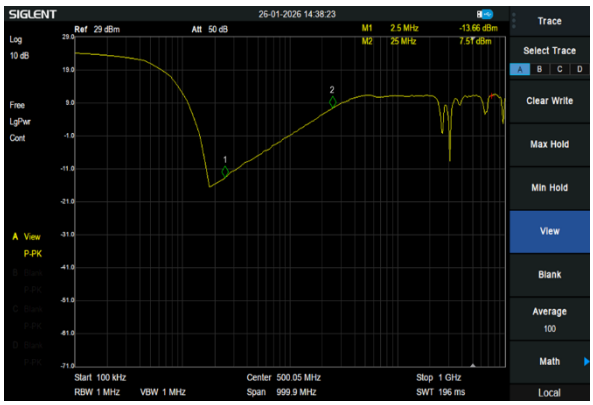
Слика 3.4 Приказ карактеристике добијене мјерењима

4. МЈЕРЕЊА НА ВИШИМ ФРЕКВЕНЦИЈАМА

Са порастом фреквенције реактанса опада (4), што доводи до јачег електричног спрезања и већег преноса сметње (приказ у *Табели 1*). Порастом фреквенције импеданса паразитних капацитивности значајно опада и почиње да се изједначава са отпорностима у колу. На довољно високим фреквенцијама коло постаје доминантно капацитивно и више не зависи од фреквенције нити отпорност има било какав даљи утицај на пренос. Систем улази у стабилизовано подручје у којем се јавља препознатљиви плато преслушавања, а максимални пренос сигнала одређен је искључиво међусобним односом капацитивности унутар посматране структуре. За визуелизацију сигнала у вишем фреквенцијском домену коришћен је спектрални анализатор са уграђеним tracking generator-ом (TG) као синхронизованим изворот побуде (*Слика 4.1*). Излаз TG-а повезан је на агресорски вод уз прилагођење импедансе везивањем отпорника од 50 Ω. Индуковани сигнал на воду-жртви вођен је на улаз анализатора преко претпојачавача од PA303.



Слика 4.1 Приказ експерименталне поставке са CA и PA303



Слика 4.2 Приказ карактеристике спектралног анализатора

Слика 4.2 приказује карактеристику на којој се уочава пораст од око 20dB/dec у области нижих фреквенција (маркери M1 и M2), након чега се постиже заравњени дио (плато) на вишим фреквенцијама, након којег се јављају резонантне појаве које нису предмет овог рада. Уочава се да преслушавање у нижем фреквенцијском опсегу зависи од фреквенција, након чега на вишим фреквенцијама престаје та зависност и систем улази у стабилизовано подручје. Природа карактеристике *(Слика 4.2)* је иста као и карактеристике добијене мјерењима на осцилоскопу приказане на *Слици 3.4*.

5. ДИСКУСИЈА

Добијени резултати мјерења показују добро поклапање са теоријским моделом капацитивног преслушавања. У складу са изразом (4), повећањем фреквенције долази до смањења капацитивне реактансе, што омогућава већи проток спрегнуте струје између агресорског и жртвеног проводника. Као посљедица тога, са порастом фреквенције долази до повећања нивоа преслушавања, односно смањења слабљења између два проводника. Промјеном међусобног растојања проводника потврђена је зависност преслушавања од међусобне капацитивности. Према изразу (2), повећање растојања између проводника доводи до смањења капацитивности, а самим тим и до слабљења капацитивне спреге. Експериментални резултати показују да су највеће вриједности преслушавања добијене за најмање растојање проводника, док се са повећањем растојања ниво спрегнутог сигнала смањује. Утицај оптерећења проводника-жртве такође је у складу са теоријским очекивањима. Веће вриједности отпорности оптерећења доводе до појаве већег напона на проводнику жртве, јер је струја настала капацитивним спрезањем мање пригушена. Смањењем отпорности оптерећења долази до ефикаснијег одвођења спрегнуте струје, што резултује мањим нивоом преслушавања. Резултати добијени симулацијом модела са сконцентрисаним параметрима у MicroCap-у показују исто фреквенцијско понашање као и експериментална мјерења. Уочена појава платоа на вишим фреквенцијама одговара услову када капацитивна реактанса постаје знатно мања од отпорности оптерећења, па пренос сигнала више није ограничен само отпорним елементима кола.

6. ЗАКЉУЧАК

У овом раду је кроз теоријску, симулациону и експерименталну анализу успјешно верификован модел капацитивног преслушавања између паралелних проводника, при чему је потврђен карактеристичан раст преносног односа од 20dB по декади на нижим фреквенцијама. Мјерења су доказала да се ниво сметњи на воду-жртви ефикасно сузбија повећањем међусобног растојања (смањењем капацитивности Cm) и смањењем отпора оптерећења. Добијени резултати и методологија пружају директне практичне смјернице за оптимизацију дизајна штампаних плоча (PCB), унапрјеђење сигналног интегритета и превентивну дијагностику сметњи у области електромагнетне компатибилности (EMC).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Chayton R. Paul „Introduction to electromagnetic compatibility 2nd edition”, Wiley-Interscience, 2006.

[2] Dr Ben Yelverton , „Exact capacitance of parallel wires, valid for any separation”, приступљено децембра 2025, https://www.youtube.com/watch?v=X84MVLe3ip0

[3] S. W. Ellingson, „7.1: Parallel Wire Transmission Line“, Electromagnetics II, Virginia Tech Libraries' Open Education Initiative, приступљено децембра 2025, https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Electricity_and_Magnetism/Electromagnetics_II_(Ellingson)/07%3A_Transmission_Lines_Redux/7.01%3A_Parallel_Wire_Transmission_Line

[4] J. C. Rawlins, „Basic AC Circuits, Second Edition“, Newnes, 2000.

Кратка биографија



Дања Горонић рођена 24.04.2001. године у Приједору. Завршила је Гимназију „Свети Сава“ у Приједору. Основне академске студије на Факултету техничких наука из области Електронике, енергетике и телекомуникација – смјер Примењена електроника завршава 2024. године. Тренутно је студент мастер академских студија на Факултету техничких наука из области Примењене електронике. Контакт: danjagoroni@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 4.9
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36BE59Stojanovic

Дизајн и имплементација *EIP-7702*-компатибилног *Ethereum* вишепотписног дигиталног новчаника

Design and Implementation of an EIP-7702-Compatible Ethereum Multi-Signature Wallet

Александар Стојановић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – РАЧУНАРСТВО И АУТОМАТИКА

Кратак садржај – *У овом раду представљен је вишепотписни Ethereum новчаник који решава два ограничења стандардног налога у власништву корисника (EOA): одсуство вишепотписне ауторизације и потребу за две одвојене трансакције при депоновању ERC-20 токена. Предложено решење комбинује вишепотписни паметни уговор са EIP-7702 механизмом делегације кода, чиме корисник у једној трансакцији атомски одобрава и депонује средства. Рад укључује и демонстрацију система стварним трансакцијама на Sepolia тест мрежи, којима је потврђена уштеда гаса од приближно 38% у односу на класичан приступ.*

Кључне речи: *блокчејн, вишепотписни уговори, EIP-7702, апстракција налога*

Abstract – *This paper presents a multisig Ethereum wallet that addresses two limitations of the standard externally owned account (EOA): the lack of multisignature authorization and the need for two separate transactions when depositing ERC-20 tokens. The proposed solution combines a multisig smart contract with the EIP-7702 code delegation mechanism, allowing a user to atomically approve and deposit funds in a single transaction. The work includes a demonstration of the system with real transactions on the Sepolia test network, confirming a gas saving of approximately 38% compared to the classic approach.*

Keyword: *blockchain, multisig contracts, EIP-7702, account abstraction*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Душан Гајић, ред. проф.

1. УВОД

Блокчејн технологија, уведена *Bitcoin* мрежом [1], омогућила је настанак дигиталне имовине без централизованог посредника. Стандардни *Ethereum* налог у власништву корисника (*Externally Owned Account, EOA*) ауторизује сваку трансакцију искључиво једним приватним кључем, без могућности дефинисања прага сагласности више страна [2]. Ово представља јединствену тачку отказа: компромитовање једног кључа даје неограничен приступ целокупној имовини налога. Вишепотписни (*multisig*) протоколи решавају овај проблем захтевањем сагласности *M* од *N* потписника пре извршења трансакције, на начин аналоган потписивању корпоративних рачуна у традиционалним финансијама.

Додатни проблем јавља се при раду са *ERC-20* токенима [3]: стандард захтева да корисник пошаље трансакцију *approve()*, а тек затим паметни уговор може позвати *transferFrom()* у другој, засебној трансакцији. Корисник плаћа накнаду за гас два пута и потврђује две одвојене блокчејн операције, што је посебно изражено код вишепотписних новчаника, где више корисника дели власништво над заједничким средствима.

Овај рад представља вишепотписни *Ethereum* новчаник који комбинује *M*-од-*N* паметан уговор са механизмом *EIP-7702* [4], уведеним *Ethereum* надоградњом *Pectra* [5], који омогућава да *EOA* привремено изврши код паметног уговора у оквиру једне трансакције. Систем је реализован као екстензија за *Chromium*-базиране претраживаче и тестиран на *Sepolia* тестној мрежи.

2. ВИШЕПОТПИСНИ ПРОТОКОЛИ И *EIP-7702*

Ethereum разликује два типа налога: *EOA*, контролисан приватним кључем и налог паметног уговора, чији је код трајно записан на блокчејну и извршава се на *Ethereum* виртуелној машини [6]. Вишепотписни уговор имплементира образац *M*-од-*N* тако што чува листу овлашћених потписника и праг потребних потписа, а свака трансакција пролази кроз три фазе: предлагање (*propose*), потписивање (*sign*) и извршавање (*execute*), аналогно протоколима попут *Safe* [7].

EIP-7702 [4] уводи трансакцију типа 4 која носи листу овлашћења (*authorization_list*). Свако овлашћење садржи идентификатор мреже, циљну адресу паметног уговора и *nonce* вредност и потписано је приватним кључем налога који делегира извршавање. Када мрежа прихвати овлашћење, у код слот *EOA* налога уписује се делегацијски означивач – 23-бајтна вредност *0xef010* надовезана 20-бајтном адресом циљног уговора. Бајт *0xef* је резервисан као неважећи *EVM* бајткод још ранијим *EIP-3541*, чиме је

загарантовано да се означивач никада не може помешати са бајткодом правог паметног уговора. Од тренутка уписа, сваки позив ка том *EOA* налогу извршава код циљног уговора у контексту налога – *address(this)* унутар тог кода враћа адресу *EOA*-а, а не циљног уговора – све док се делегација експлицитно не опозове слањем овлашћења са нултом адресом. За разлику од потпуне апстракције налога какву предлаже *EIP-4337* [8], *EIP-7702* не захтева трајну промену типа налога, па налог остаје *EOA* пре, током и после делегације.

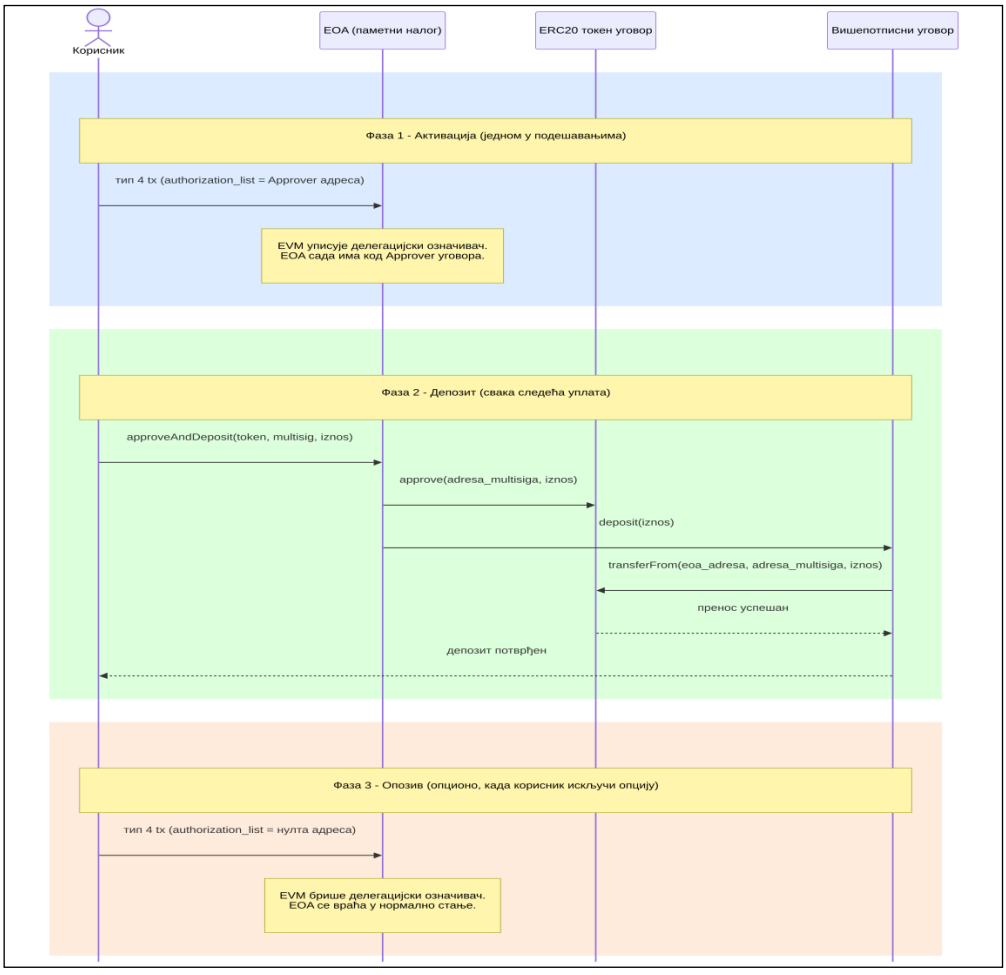
Практична употреба овог механизма за депоновање *ERC-20* токена одвија се у три фазе. У првој фази корисник једном активира „паметни налог" слањем трансакције типа 4 чије овлашћење показује на *Approver* уговор. У другој фази, свако наредно депоновање одвија се као једна обична трансакција у којој *EVM* атомски извршава и одобрење и пренос средстава, јер *EOA* већ носи код *Approver* уговора. У трећој, опционалној фази, корисник опозива делегацију слањем још једне трансакције типа 4 чији циљ је нулта адреса, чиме се *EOA* враћа у првобитно стање обичног налога без кода.

2.1. Безбедносна својства

Свако овлашћење мора носити *nonce* вредност која одговара тренутној *nonce* вредности потписничког *EOA*-а, чиме се спречава напад поновном употребом потписа – једном искоришћено овлашћење не може се поново применити јер ће *nonce* у међувремену бити повећан. Идентификатор мреже у овлашћењу везује делегацију за конкретну *Ethereum* мрежу, па овлашћење потписано за *Sepolia* тестну мрежу не може бити преузето и примењено на главној мрежи. Ова два механизма заједно осигуравају да власник *EOA*-а у сваком тренутку има пуну контролу над тиме када, где и на који уговор је активан делегацијски означивач.

2.2. Историјат

EIP-7702 није први предлог овакве функционалности. Претходни предлог, *EIP-3074* [9], увео би два нова *EVM* оп-кода, *AUTH* и *AUTHCALL*, којима би паметан уговор могао да извршава позиве у име *EOA*-а који га је овластио, на сличан начин. Предлог је напуштен у корист *EIP-7702*, првенствено зато што увођење потпуно нових оп-кодова захтева трајне измене *EVM*-а, док *EIP-7702* исти циљ постиже увођењем новог типа трансакције, што је једноставније за интеграцију у постојећи протокол и алатке.



Слика 1. Трофазни ток депоновања *ERC-20* токена путем *EIP-7702* делегације: активација „паметног налога", атомски депозит и опционални опозив делегације

3. ПОСТОЈЕЋА РЕШЕЊА

Више постојећих решења делимично адресира проблем безбедног управљања заједничким дигиталним средствима, али свако од њих доноси компромисе релевантне за овај рад.

Gnosis Safe [7, 10] је најзаступљенији вишепотписни новчаник на *Ethereum* мрежи, али је заснован искључиво на паметним уговорима: корисник објављује нови уговор који постаје власник средстава, док оригинални *EOA* губи улогу примарне адресе. Ово подразумева миграцију имовине и губитак *EOA* идентитета.

EIP-4337 [8] уводи апстракцију налога путем алтернативног *mempool*-а и *bundler* чворова који групишу корисничке операције. Овим механизмом могуће је имплементирати вишепотписне шеме, али и он захтева напуштање *EOA* модела и зависност од инфраструктуре која није део језгра *Ethereum* протокола.

Permit2 [11], решење *Uniswap*-а [12], уместо појединачних одобрења користи једно максимално одобрење ка самом *Permit2* уговору, након чега се свако наредно одобрење потписује ван ланца. Овим се решава проблем вишеструких одобрења, али по цену безбедносног компромиса: компромитовање *Permit2* уговора или потписивање злоћудне поруке омогућава нападачу приступ свим токенима које је корисник икада одобрио.

Ниједно од наведених решења не комбинује одржавање *EOA* идентитета, *M*-од-*N* вишепотписну ауторизацију и атомски депозит *ERC-20* токена без трајних неограничених одобрења трећим странама – управо ту празнину попуњава решење развијено у овом раду.

4. ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА

Систем се састоји од два паметна уговора и клијентске *React* екстензије која комуницира са *Ethereum* мрежом путем *ethers.js* библиотеке [13], без посредног серверског залеђа – екстензија комуницира искључиво директно са *RPC* чвором мреже. Дељена пословна логика (вишепотписна ауторизација, *EIP-7702* делегација) у потпуности се налази у паметним уговорима, док клијентска страна само конструише, потписује и шаље трансакције, као и очитава стање уговора.

Уговор *MultiSig* чува мапирање овлашћених потписника и праг *minSignatures*. Предлог трансакције идентификован је вредношћу *txHash = keccak256(posiljalac, nonce++)*, намерно независном од садржаја саме трансакције, како би се избегле колизије између истоветних узастопних предлога. Функција *execute* преноси средства тек када број потписа достигне праг и уговор располаже довољним износом.

Уговор *Approver* имплементира функцију *approveAndDeposit*, која редом позива *approve()* над *ERC-20* токеном и *depositToken()* над *MultiSig* уговором. Када је налог корисника делегиран на овај уговор путем *EIP-7702*, позив *approveAndDeposit* на сопствену адресу извршава обе операције у оквиру једне трансакције, јер се *address(this)* унутар делегираног кода разрешава на адресу самог *EOA* налога, а не на адресу уговора *Approver*.

Клијентска страна конструише и потписује трансакцију типа 4 преко *ethers.js* библиотеке [13] позивом *signer.authorize({address, nonce})*, који гради и потписује овлашћење, након чега се шаље као самопозив – поље *to* трансакције једнако је сопственој адреси пошиљаоца, јер се *authorization_list* обрађује независно од одредишта трансакције. Најосетљивији део имплементације је тачна *nonce* вредност овлашћења: протокол прихвата овлашћење само ако се поклапа са тренутном *nonce* вредношћу потписника у тренутку обраде, а та обрада се извршава тек пошто је слање саме трансакције већ повећало *nonce* пошиљаоца за један. Када су пошиљалац трансакције и потписник овлашћења иста адреса, као у овом самопослатом обрасцу, овлашћење мора носити вредност *tekuci_nonce + 1*, а не *tekuci_nonce* прочитан непосредно пре слања. Стварна трансакција забележена на *Sepolia* мрежи ово потврђује: трансакција носи *nonce=2*, док потписано овлашћење унутар ње носи вредност 3, уз *chainId=0xaa36a7* (*Sepolia*). Након потврђивања, очитавање кода налога (*eth_getCode*) враћа тачно *0xef0100* надовезано адресом *Approver* уговора, чиме је потврђено да је делегација примењена на мрежи. Опозив делегације користи идентичан образац, са нултом адресом као циљем овлашћења.

Клијентски слој излаже два одвојена позива за депоновање токена, тако да корисник може бирати између њих. Функција *depositTokenWithDelegation* претпоставља да је делегација већ активна и позива *approveAndDeposit* на сопствену адресу, чиме се цео депозит обавља једном трансакцијом. Насупрот томе, пар функција *approveTokenClassic* и *depositTokenClassic* репродукује класичан двотрансакцијски ток – прва позива *approve()* директно на токен уговору, а друга тек након тога *depositToken()* на *MultiSig* уговору. Ова два пута у коду су оно што омогућава директно мерење разлике у потрошњи гаса приказано у наредном поглављу, јер оба пута завршавају у истом крајњем стању *MultiSig* уговора.

5. ДЕМОНСТРАЦИЈА И РЕЗУЛТАТИ

Функционалност система потврђена је сценарием са три овлашћена потписника и прагом 2 од 3, извршеним на *Sepolia* тест мрежи над наменски објављеним *MultiSig* уговором и помоћним *ERC-20* токеном. Први корисник предлаже и потписује пренос 50 токена другом кориснику, други корисник додаје други потпис, након чега оба корисника депонују потребна средства – сваки користећи сопствени ток, са и без активне *EIP-7702* делегације.

Обједињени приступ захтева једно потписивање уместо два и смањује потрошњу гаса за приближно 38%, уз идентичан крајњи ефекат – уговор *MultiSig* прима исти износ токена, спреман за даље извршавање већ потписаног предлога.

Цео сценарио прати исту логичку путању кроз уговор *MultiSig*, независно од тога да ли је активна *EIP-7702* делегација: предлагач позива *propose*, чиме се у уговору уписује нов унос идентификован вредношћу *txHash*, остали потписници позивају *sign* над истим идентификатором, а уговор интерно пребројава потписе по сваком предлогу. Тек када број потписа достигне праг, било који учесник може позвати *execute*, који преноси средства само ако уговор у међувремену располаже довољним депозитованим износом – чиме су предлагање и потписивање потпуно независни од тренутка када су средства стварно депонована.

6. ЗАКЉУЧАК

Рад је показао да комбинација вишепотписног паметног уговора и *EIP-7702* делегације кода значајно унапређује корисничко искуство при раду са *ERC-20* токенима, без потребе за потпуном миграцијом налога на новчанике имплементиране уз помоћ паметног уговора (*smart contract wallets*). Исти образац – обједињавање више узастопних позива у једну трансакцију путем привременог понашања паметног уговора – није ограничен на депозит токена у вишепотписни уговор, већ се може применити на било који ток који данас захтева више одвојених трансакција.

6.1. Ограничења

Тренутна имплементација тестирана је искључиво на *Sepolia* тест мрежи и није прошла независну безбедносну ревизију, што је предуслов за разматрање употребе на главној мрежи. Управљање приватним кључем ослања се на директан унос или генерисање кључа и шифровање лозинком, без подршке за стандардизоване мнемоничке фразе (*BIP-39*) или хардверске новчанике. Фокус рада је намерно ограничен на вишепотписни уговор и *EIP-7702* делегацију, док подршка за вишепотписне трансакције у нативној *ETH* валути остаје ван домена овог рада.

6.2. Будући рад

Пре разматрања употребе на главној мрежи неопходна је независна безбедносна ревизија уговора *MultiSig* и *Approver*, као и усклађивање управљања приватним кључем са уобичајеном праксом индустрије. Приказ историје трансакција путем јавног *API*-ја и подршка за више *Ethereum* мрежа истовремено представљају природно проширење корисничког интерфејса. Са аспекта саме *EIP-7702* делегације, примењени образац није ограничен на депозит *ERC-20* токена, већ би могао постати општи механизам за побољшање корисничког искуства у ширем скупу *Ethereum* апликација.

7. ЛИТЕРАТУРА

[1]S. Nakamoto, "Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system", 2008. URL: https://bitcoin.org/bitcoin.pdf (pristupljeno u julu 2026)

[2]A.M.Antonopoulos, G.Wood, "Mastering Ethereum: Building Smart Contracts and DApps", O'Reilly Media, 2018.

[3]F.Vogelsteller, V.Buterin, "EIP-20: Token Standard", 2015. URL: https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-20 (pristupljeno u julu 2026)

[4]V.Buterin et al., "EIP-7702: Set EOA account code", 2024. URL: https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-7702 (pristupljeno u julu 2026)

[5]T.Beiko, "EIP-7600: Hardfork Meta - Pectra", 2025. URL: https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-7600 (pristupljeno u julu 2026)

[6]G.Wood, "Ethereum: A secure decentralised generalised transaction ledger", 2024. URL: https://ethereum.github.io/yellowpaper/paper.pdf (pristupljeno u julu 2026)

[7]Safe Ecosystem Foundation, "Safe: Smart account overview", 2023. URL: https://docs.safe.global/advanced/smart-account-overview (pristupljeno u julu 2026)

[8]V.Buterin et al., "EIP-4337: Account Abstraction Using Alt Mempool", 2021. URL: https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-4337 (pristupljeno u julu 2026)

[9]S.Wilson, M.Zoltu, "EIP-3074: AUTH and AUTHCALL opcodes", 2020. URL: https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-3074 (pristupljeno u julu 2026)

[10]M.di Angelo, G.Salzer, "Wallet Contracts on Ethereum - Identification, Types, Usage, and Profiles", arXiv preprint, 2020. URL: https://arxiv.org/abs/2001.06909 (pristupljeno u julu 2026)

[11]Uniswap Labs, "Permit2: Next Generation Token Approvals", 2022. URL: https://github.com/Uniswap/permit2 (pristupljeno u julu 2026)

[12]Uniswap Labs, "Uniswap v3 Core", 2021. URL: https://uniswap.org/whitepaper-v3.pdf (pristupljeno u julu 2026)

[13]R.Moore, "ethers.js - Complete Ethereum library for JavaScript", 2024. URL: https://docs.ethers.org/v6/ (pristupljeno u julu 2026)

Кратка биографија:



Александар Стојановић рођен је у Новом Саду 2000. год. Основне академске студије на Факултету техничких наука из области Електротехнике и рачунарства завршио је 2023.год. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Рачунарства и аутоматике одбранио је 2026.год.
Контакт: al.stojanovic0@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 4.9
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36BE61Savic

Примена алата заснованих на вештачкој интелигенцији у реинжењерингу информационих система

Application of Artificial Intelligence-Based Tools in Information Systems Reengineering

Анастасија Савић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – СОФТВЕРСКО ИНЖЕЊЕРСТВО И ИНФОРМАЦИОНЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ

Кратак садржај – *У раду је приказан процес реинжењеринга болничког информационог система уз примену алата заснованих на вештачкој интелигенцији (AI). Истраживање обухвата примену AI асистента (Google Gemini) и AI агента (OpenAI Codex) у фазама анализе изворног кода, генерисања дијаграма обједињеног језика за моделовање (UML), реинжењеринга базе података и модернизације апликационог слоја. Приказани резултати показују могућности примене AI алата у реконструкцији документације, моделовању система и подршци у фазама реинжењеринга, уз неопходну верификацију добијених резултата од стране стручњака.*

Кључне речи: *вештачка интелигенција, реинжењеринг информационих система, AI асистенти, AI агенти*

Abstract – *This paper presents the process of re-engineering a hospital information system using artificial intelligence (AI)-based tools. The research involves the application of an AI assistant (Google Gemini) and an AI agent (OpenAI Codex) in the phases of source code analysis, unified modeling language (UML) model generation, database reengineering, and application layer modernization. The presented results demonstrate the potential of AI tools for documentation reconstruction, system modeling, and supporting various phases of the re-engineering process, while emphasizing the necessity of expert verification of the generated results.*

Keywords: *artificial intelligence, information systems re-engineering, AI assistants, AI agents*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је била др Славица Кордић, ван. проф.

1. УВОД

Реинжењеринг информационих система представља сложен процес модернизације постојећих софтверских решења са циљем побољшања њихове одрживости, ефикасности и прилагодљивости савременим технолошким захтевима [1], [2]. Традиционални приступи реинжењеринга често захтевају значајан ангажман стручњака и дуг временски период за анализу постојећег система, реконструкцију документације и трансформацију софтверских компоненти.

Развој вештачке интелигенције (*AI*) и великих језичких модела омогућила је примену нових приступа у софтверском инжењерству [3]. Савремени *AI* алати помажу програмерима при писању програмског кода, способни су да разумеју целокупне базе кода, предлажу архитектонске трансформације и самостално решавају комплексне инжењерске проблеме [4].

Циљ овог рада је испитивање могућности примене *AI* алата у процесу реинжењеринга на примеру болничког информационог система [5], у фазама анализе система, реинжењеринга базе података и модернизације апликационог слоја.

2. ПРЕГЛЕД АКТУЕЛНОГ СТАЊА У ОБЛАСТИ ИСТРАЖИВАЊА

Савремени *AI* алати засновани на великим језичким моделима све чешће се користе у процесима софтверског инжењерства [3], [4]. У пракси се могу разликовати *AI* асистенти и *AI* агенти.

AI асистенти, као што је *Google Gemini* [6], пружају интерактивну подршку кориснику кроз анализу захтева, генерисање препорука и креирање садржаја на основу задатих упита.

Са друге стране, *AI* агенти, као што је *OpenAI Codex* [7], поседују већи степен аутономије и способни су за анализу сложенијих софтверских система, идентификацију њихових компоненти и извршавање задатака у више корака.

Због различитих карактеристика ових приступа, за потребе истраживања у оквиру овог рада, коришћена су оба типа алата. *Gemini* је примењен за формулисање смерница током моделовања система, миграције базе података и анализе резултата статичке анализе кода, док је *Codex* коришћен за анализу изворног кода, генерисање модела, трансформацију базе података и рефакторисање апликационог слоја.

3. АНАЛИЗА ПОСТОЈЕЋЕГ СИСТЕМА

Као студија случаја коришћен је постојећи информациони систем за подршку раду болнице [5]. Систем је реализован као вишеслојна веб апликација која користи *React* на клијентској страни, *ASP.NET Core Web API* на серверској страни и *PostgreSQL* систем за управљање базом података.

3.1. Анализа кода

Пре почетка процеса реинжењеринга било је неопходно извршити детаљну анализу постојећег решења. У традиционалном приступу ова фаза подразумева ручно проучавање документације и анализу великог броја изворних датотека, што представља временски захтеван процес. У овом истраживању испитана је могућност примене *AI* агента *Codex* ради аутоматизације ових активности.

Анализом је утврђено да је постојећи болнички информациони систем [5] организован као слојевита архитектура са јасно издвојеним слојевима корисничког интерфејса, пословне логике и приступа подацима. *AI* алат је успешно идентификовао кључне доменске ентитете као што су пацијент, доктор, медицински картон, преглед, операција и лек. Поред идентификације ентитета, издвојене су и њихове међусобне зависности, као и главни токови података кроз систем.

Слика 1 представља апстрактни модел анализираног болничког информационог система [5], добијен применом *AI* алата *Codex*, који приказује његове главне компоненте и њихове међусобне односе и омогућава лакше разумевање његове архитектуре и организације.



Слика 1. Апстрактни модел система генерисан применом *AI* алата *Codex*

Анализом изворног кода добијен је приказ основне структуре болничког информационог система [5], укључујући кључне компоненте, доменске ентитете и њихове међусобне зависности. Добијени резултати послужили су као основа за даље активности моделовања и реинжењеринга.

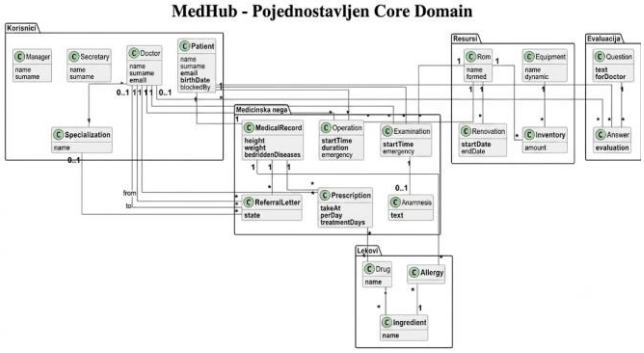
3.2. Моделовање система

Поред анализе архитектуре, *AI* алати су коришћени за генерисање дијаграма обједињеног језика за моделовање (*UML)* [8].

Пре почетка генерисања *UML* дијаграма коришћен је алат *Gemini* ради избора најпогоднијег приступа за аутоматизовано моделовање система. На основу анализе захтева и карактеристика расположивих алата предложена је употреба *PlantUML* технологије [9] као посредног формата за опис *UML* модела. Након тога је *Codex* генерисао *PlantUML* скрипте на основу изворног кода, док је за њихову визуелизацију и даљу обраду коришћен алат *draw.io*.

Као резултат овог процеса генерисани су дијаграм класа, дијаграм секвенци и дијаграм случајева коришћења. Генерисани *UML* дијаграми успешно су приказали структуру и функционалност система из различитих перспектива.

Исправност генерисаног класног дијаграма, приказаног на слици 2, проверена је поређењем са постојећом имплементационом шемом базе података. Утврђено је да су кључни ентитети идентификовани у *UML* моделу присутни као одговарајуће табеле у бази података, док приказане релације одговарају везама реализованим путем страних кључева. Добијени резултати указују на висок степен подударности између генерисаног *UML* модела и имплементиране структуре базе података и доменског модела у изворном коду.



Слика 2. Дијаграма класа генерисан путем *AI* алата *Codex*

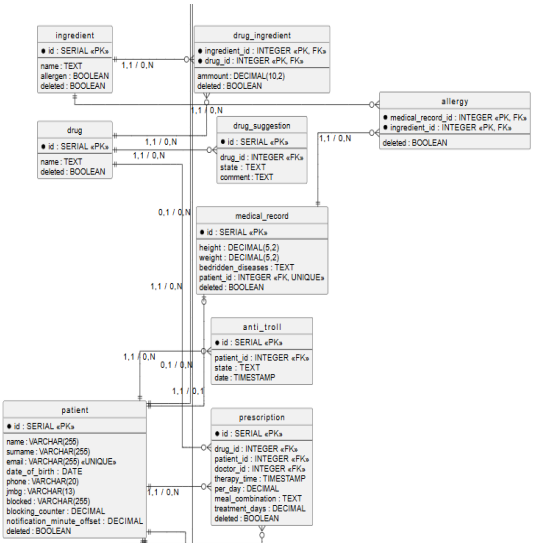
4. РЕИНЖЕЊЕРИНГ БАЗЕ ПОДАТАКА

Реинжењеринг базе података спроведен је применом фаза реверзног инжењеринга, реструктурирања и инжењеринга према напред [1], [2]. Циљ овог процеса био је разумевање постојеће структуре базе података, идентификација могућности за њено унапређење и припрема за миграцију у друго окружење за управљање базама података.

Полазну основу представљала је *PostgreSQL* база података болничког информационог система [5], која садржи податке о пацијентима, лекарима, медицинским картонима, прегледима, операцијама, терапијама и другим аспектима рада здравствене установе. У циљу анализе структуре базе података извршен је извоз метаподатака из алата *pgAdmin*, који су затим прослеђени *AI* алату *Codex* ради екстракције шеме базе података.

На основу табела, примарних и страних кључева, као и *NOT NULL* и *UNIQUE* ограничења, идентификованих анализом достављених метаподатака, *AI* алат је реконструисао логичке ентитете, релације између њих док су максимални и минимални кардиналитети изведени на основу структуре кључева и претходно идентификованих ограничења. Добијени резултати представљени су ентитети–релације (*ER)* моделом. Део генерисаног *ER* дијаграма приказан је на слици 3.

Поређењем са ручно креираним *ER* моделом утврђено је да су логички ентитети, релације и максимални кардиналитети исправно реконструисани. Додатно, генерисани *ER* модел је омогућио приказ минималних кардиналитета дефинисаних на основу *NOT NULL* ограничења.



Слика 3. Део генерисаног ER дијаграма помоћу *AI* алата *Codex*

Након реконструкције постојеће шеме спроведена је фаза реструктурирања базе података. *AI* алат је анализирао постојећи модел и предложио измене које обухватају увођење додатних *UNIQUE* и *CHECK* ограничења, семантичке корекције атрибута и стандардизацију домена података уједначавањем типова података, ради отклањања неконзистентности у моделу.

У фази инжењеринга према напред извршена је трансформација реструктуриране *PostgreSQL* шеме у *Oracle Database 26ai* шему. У овој фази посебна пажња посвећена је типовима података и њиховом прилагођавању циљном *Oracle* окружењу.

Након тога, за потребе планирања миграције података, коришћен је *AI* алат *Gemini*, који је предложио више приступа миграције из *PostgreSQL* у *Oracle* окружење, при чему је као најпогодније решење издвојио примену алата *Oracle SQL Developer Migration Wizard*. Наведени алат је затим коришћен за извршавање процеса миграције података, након успостављања конекције са изворном *PostgreSQL* и циљном *Oracle* базом података. Исправност миграције потврђена је поређењем броја записа у свим табелама и успешним функционисањем апликације над мигрираном базом података.

Иако претходно генерисана *Oracle* шема базе података није била неопходна за одабран начин миграције података, она је задржана како би се проверило да ли *Codex* алат може успешно да конвертује *PostgreSQL* шему у *Oracle* шему базе података, јер је код појединих приступа миграцији, као што је извоз података у формат вредности раздвојених зарезом (*CSV*), претходно генерисана шема циљне базе података неопходна.

Током истраживања уочено је да *AI* алати могу значајно убрзати анализу и разумевање сложених база података, као и процес њихове трансформације и миграције. Ипак, поједини генерисани резултати захтевали су додатну ручну проверу, пре свега због разлика у синтакси *Oracle* система и трансформације *PostgreSQL* специфичних типова података у њихове *Oracle* еквиваленте.

5. РЕИНЖЕЊЕРИНГ АПЛИКАЦИОНОГ СЛОЈА

У оквиру модернизације апликационог слоја испитивана је примена *AI* алата у рефакторисању серверског и клијентског дела система за подршку раду болнице [5]. Циљ истраживања био је да се процени у којој мери алати засновани на вештачкој интелигенцији могу подржати анализу постојећег кода, отклањање уочених недостатака и модернизацију софтверске архитектуре уз очување постојећих функционалности система.

5.1. Реструктурирање серверског слоја

У истраживању је коришћен *AI* алат *Codex* за анализу изворног кода, идентификацију проблема и генерисање измена, док је *SonarQube* коришћен за објективну процену квалитета кода пре и након реструктурирања.

Пре почетка рефакторисања спроведена је статичка анализа комплетног серверског слоја. Анализа је обухватила контролере, сервисе и компоненте за приступ подацима и указала на постојање безбедносних рањивости, багова, проблема у структури кода и одсуство аутоматизованих тестова.

У циљу лакше интерпретације резултата *SonarQube* анализе коришћен је и *Gemini*, који је предложио начин извоза и организације резултата у облику погодном за даљу обраду од стране *Codex* агента.

На основу добијених резултата *Codex* је извршио рефакторисање кода кроз више итерација. Извршене су исправке логичких грешака у пословној логици, уклоњене су хардкодоване лозинке из конфигурационих датотека и имплементирано је чување осетљивих података у *.env* окружењу. Поред тога, извршена је реорганизација појединих делова кода, уклањање сувишних конструкција и побољшање структуре метода које су доприносиле повећању техничког дуга.

У завршној фази *Codex* је генерисао јединичне тестове за кључне функционалности система и извршио иницијалну валидацију њихове исправности. Након поновљене *SonarQube* анализе уочено је смањење броја уочених проблема и повећање тестне покривености.

Резултати показују да *AI* алати могу успешно подржати процес рефакторисања и унапређења квалитета серверског кода, али да је за потврду исправности предложених измена неопходна додатна верификација од стране програмера.

5.2. Модернизација клијентског слоја

На клијентској страни истраживање је обухватило два аспекта модернизације: миграцију постојеће *React* апликације са *JavaScript* на *TypeScript* технологију и унапређење корисничког интерфејса и корисничког искуства.

У првој фази *AI* алат *Codex* је анализирао постојећу *JavaScript* имплементацију и извршио њену постепену миграцију на *TypeScript*. Током процеса конвертоване су постојеће компоненте, уведена статичка типизација и дефинисани типови за податке, форме и компоненте корисничког интерфејса. Након сваке фазе миграције спроведена је аутоматизована провера исправности

кроз *TypeScript* анализу и процес изградње (*build*) апликације. Резултати су показали да је могуће аутоматизовати значајан део процеса миграције уз очување постојеће функционалности система.
Након техничке модернизације кода, *Codex* је коришћен за анализу корисничког интерфејса и идентификацију могућности за његово унапређење. Алат је препознао проблеме који се односе на конзистентност навигације, распоред елемената интерфејса и респонзивност апликације на уређајима различитих димензија. На основу анализе предложена су и имплементирана побољшања која су обухватила стандардизацију навигационих компоненти, унапређење распореда елемената применом *flex layout* механизама и побољшање визуелних индикатора интеракције.
Посебно значајан резултат односи се на унапређење респонзивности корисничког интерфејса, при чему су отклоњени проблеми са преклапањем елемената и ограниченом доступношћу појединих контрола. Иако су уочена значајна побољшања, анализа је показала да поједине странице и даље захтевају додатне итерације оптимизације.

6. ЗАКЉУЧАК

Основни научни допринос рада огледа се у евалуацији могућности примене *AI* асистената и *AI* агената у различитим фазама реинжењеринга информационих система и сагледавању њихове улоге у модернизацији наслеђених софтверских решења.
Резултати истраживања показали су да алати *Google Gemini* и *OpenAI Codex* могу да убрзају активности анализе, реконструкције модела, трансформације базе података и модернизације апликационог слоја над постојећим болничким информационим системом [5]. Посебна вредност ових алата огледа се у способности аутоматизације дела инжењерских активности и генерисању предлога који могу послужити као подршка током процеса реинжењеринга.
Истовремено, истраживање је показало да квалитет добијених резултата зависи од расположивог контекста и квалитета улазних података. Иако су *AI* алати показали висок ниво корисности, поједини резултати захтевали су додатну ручну проверу и валидацију, што указује да улога софтверског инжењера остаје кључна у доношењу коначних одлука и обезбеђивању исправности решења.
Добијени резултати указују да *AI* алати представљају значајну подршку у процесу реинжењеринга информационих система, али не и потпуну замену за инжењерско знање и експертизу.
Будућа истраживања могу бити усмерена ка анализи напреднијих *AI* платформи и њиховој примени у сложенијим сценаријима модернизације софтверских система.

7. ЛИТЕРАТУРА

[1] E. J. Chikofsky and J. H. Cross, “Reverse engineering and design recovery: A taxonomy”, *IEEE software*, vol. 7, no. 1, pp. 13–17, 1990.
[2] C. Wagner, Model-Driven Software Migration: A Methodology: Reengineering, Recovery and Modernization of Legacy Systems. Springer Science & Business Media, 2014.
[3] M. Adawadkar, “The Evolution of Generative and Agentic AI: From Rule-Based Systems to Autonomous Intelligence”, *American Journal of Technology Advancement*, vol. 2, no. 11, 2025.
[4] A. Ndiaye, X. Taraj, B. Robeznik, G. Herzog, C. Gerber, and H. Purwins, *Generative AI in software engineering: transforming the software development process*. DFKI & Accenture, 2025.
[5] A. Savić, *Softverski paket za podršku rada bolnice*, B.Sc. thesis, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia, 2024.
[6] Google Gemini documentation https://ai.google.dev/ (pristupljeno u martu 2026.)
[7] OpenAI Codex documentation https://openai.com/index/openai-codex/ (pristupljeno u martu 2026.)
[8] G. Reggio, M. Leotta, F. Ricca, and D. Clerissi, “What are the used UML diagrams? A Preliminary Survey”, in *EESSMod@ MoDELS*, pp. 3–12, 2013.
[9] S. Carruthers, A. Thomas, L. Kaufman-Willis, and A. Wang, “Growing an accessible and inclusive systems design course with plantuml”, in *Proceedings of the 54th ACM Technical Symposium on Computer Science Education V. 1*, pp. 249–255, 2023.

Кратка биографија:



Анастасија Савић рођена је у Зрењанину 2002. год. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Електротехнике и рачунарства – Софтверско инжењерство и информационе технологије одбранила је 2026.год
Контакт:
anastasijas557@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 4.3
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36BE62Simic

Практична фузија улаза (камера и *LiDAR* сензор) за надзор саобраћаја: препознавање, праћење и бројање

Practical Camera–LiDAR Fusion for Roadside Traffic Monitoring: Detection, Tracking, and Counting

Слађана Симић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – РАЧУНАРСТВО И АУТОМАТИКА

Кратак садржај – *У раду је представљен практичан систем фузије камера–LiDAR сензор за надзор друмског саобраћаја. Предложени ток обраде спаја 2D препознавања са панорамских снимака и 3D облак тачака ради поузданијег издвајања возила. Систем обухвата издвајање панорама из E57 формата, примјену YOLO детектора, пројеђивање облака тачака и филтрирање тачака које просторном пројекцијом одговарају препознатим возилима.*
Кључне речи: *фузија сензора, камера–LiDAR сензор, YOLO, препознавање возила*

Abstract – *These work presents a practical camera–LiDAR fusion system for monitoring road traffic. The proposed pipeline combines 2D detections from panoramic images with 3D point clouds to achieve more reliable vehicle extraction. The system includes panorama generation from E57 data, YOLO-based detection, point-cloud downsampling, and spatial filtering of points corresponding to detected vehicles.*

Keywords: *sensor fusion, camera–LiDAR, YOLO, vehicle detection*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био доц. др Ненад Четић.

1. УВОД

Надзор друмског саобраћаја представља важан елемент савремених система за планирање, анализу и управљање саобраћајем. Поуздано прикупљање података о кретању и густини саобраћаја омогућава боље разумијевање протока возила, као и благовремено уочавање потенцијално ризичних ситуација на путној инфраструктури. Да би се такви подаци добили, системи надзора морају бити у стању да тачно препознају, прате и пребројe возила у различитим и често сложеним условима.

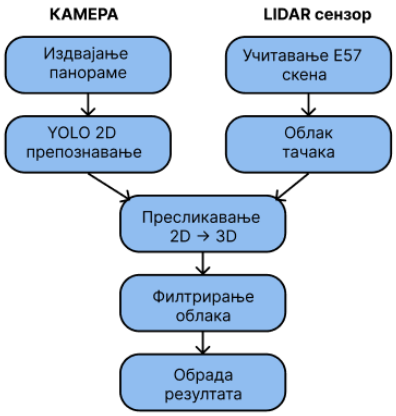
У реалним сценаријима надзора јављају се бројни изазови, као што су промјене освјетљења, временски услови, сложена структура сцене и међусобно заклањање возила. Класични системи засновани искључиво на камерама често имају ограничења у таквим условима, посебно када је ријеч о поузданој процјени растојања и просторним односима између објеката. Камере обезбјеђују богат визуелни приказ и омогућавају добру класификацију типова возила, али су осјетљиве на сјенке, одсјаје и услове слабог осветљења [1,2].

LiDAR сензори, с друге стране, пружају прецизне просторне информације и вјерно описују геометрију сцене, независно од услова осветљења, али имају ограничења у семантичком препознавању објеката. Због комплементарних карактеристика ова два сензора, фузија камера и LiDAR сензора све више се користи као практично рјешење у системима надзора саобраћаја [1-3].

Комбиновањем 2D информација са камере и 3D просторних података из LiDAR сензора добија се робуснији систем који омогућава поузданије издвајање возила у сложеним условима саобраћаја [3,4].

Циљ овог рада је да прикаже практичан поступак фузије података добијених са камере и LiDAR сензора за надзор друмског саобраћаја. У раду је описан ланац обраде који обухвата издвајање панорамских снимака из E57 формата, примјену YOLO модела за препознавање возила, као и пројекцију резултата 2D препознавања у 3D простор ради филтрирања облака тачака. Добијени филтрирани 3D подаци служе као основа за праћење трајекторија и бројање возила [4,5].

2. АРХИТЕКТУРА СИСТЕМА



Слика 1. Дијаграм тока процеса

Методологија предложеног система заснива се на фузији 2D препознавања добијених са панорамских снимака и 3D података из облака тачака LiDAR сензора ради издвајања тачака које припадају возилима. Поступак обухвата кораке од припреме E57 снимака до праћења и бројања возила (Слика 1).

2.1. Припрема података

Улазни подаци у овом систему добијени су из E57 формата, који се у пракси често користи за чување снимака са LiDAR сензора јер омогућава да се у једном фајлу сачувају просторне координате тачака, као и додатни атрибути попут интензитета, боје и сферних углова. Управо се сферни углови користе у каснијој пројекцији, чиме се између панорамске слике и 3D облака тачака остварује директна веза без потребе за додатном калибрацијом. Први корак у обради представља издвајање панорамске слике из E57 записа, која обезбјеђује потпуни 360° приказ сцене и служи као улаз за 2D препознавање возила.
Паралелно са издвајањем панораме учитава се и облак тачака из исте датотеке, након чега се примјењује вокселско проређивање којим се број тачака смањује задржавањем по једне представничке тачке по вокселу, чиме се убрзавају наредни кораци као што су филтрирање, праћење и бројање возила.

2.2. Препознавање возила у 2Д домену

Након припреме података и генерисања панорамске слике из E57 снимка, препознају се возила у 2D домену. У овом раду за препознавање је коришћен YOLO модел, који је познат по томе да у једној итерацији кроз мрежу истовремено локализује и класификује објеката. Због добре равнотеже између тачности и брзине извршавања, YOLO модели се често користе у системима надзора и реалновременске перцепције саобраћаја [5]. Примјена овог приступа на панорамским снимцима омогућава добијање стабилних резултата препознавања возила и у сценама са већом густином саобраћаја, што је у складу са резултатима приказаним у сродним радовима [1-3].



Слика 2. YOLO 2D препознавање возила на панорами добијеној из E57 фајла

Примјер резултата 2D препознавања возила на панорамској слици приказан је на Слици 2, гдје су возила означена граничним оквирима.

Резултат препознавања чине гранични оквири који описују положај возила, уз пратеће информације о класи објекта и поузданости препознавања, а ти подаци се чувају у структурисаном облику и представљају директан улаз за наредни корак, односно пројекцију резултата 2D препознавања у 3D простор.

2.3. Пројекција и филтрирање 3D тачака

Након добијања граничних оквира возила у 2D домену, сљедећи корак је њихово просторно повезивање са 3D облаком тачака. Информације о положају возила са панорамске слике користе се за издвајање одговарајућих тачака LiDAR сензора у 3D простору, чиме се остварује фузија 2D и 3D података. Овакви приступи просторне асоцијације камере и LiDAR сензора широко су заступљени у системима надзора саобраћаја и показали су се ефикасним у смањењу количине нерелевантних података [1,3].
Сваком граничном оквиру на панорами одговара одређени угаони опсег у 3D простору, дефинисан азимутом и елевацијом. На основу ових опсега филтрира се облака тачака, при чему се задржавају само оне тачке чији угаони положај упада у подручје препознатих возила, док се остале тачке елиминишу. На овај начин уклања се већина тачака које припадају тлу и околној инфраструктури, што је у складу са приступима коришћеним у сродним LiDAR-заснованим системима препознавања и праћења возила [3,4].
Филтрирањем облака тачака добија се компактнији и информативнији скуп података који просторно одговара појединачним возилима у сцени. Овако издвојени 3D подаци представљају поуздану основу за наредне кораке праћења трајекторија и бројања возила, јер значајно смањују количину нерелевантних тачака и побољшавају стабилност даље обраде [4].



Слика 3. Филтрирани 3Д облак тачака: задржане су тачке које припадају препознатим возилима

Примјер филтрираног 3D облака тачака, у којем су задржане само тачке возила, приказан је на Слици 3. Визуелна провјера оваквих резултата омогућава додатну контролу квалитета и потврђује исправност поступка фузије података.

2.4. Чување резултата

Након пројекције и филтрирања 3D тачака добија се подскуп облака тачака LiDAR сензора који садржи искључиво тачке које припадају препознатим

возилима. Овако издвојени подаци представљају резултат фузије 2D и 3D информација и служе као основа за даље кораке анализе, прије свега праћење трајекторија и бројање возила. Филтрирани облак тачака чува се у E57 и PCD форматима. E57 формат омогућава очување комплетних просторних информација и компатибилан је са даљом анализом и обрадом података LiDAR сензора, док PCD формат обезбјеђује једноставну визуелизацију и брзу провјеру квалитета издвајања у стандардним алатима за рад са облацима тачака.

2.5. Праћење возила

Након што су из облака тачака издвојене тачке које припадају возилима, сљедећи корак је повезивање резултата препознавања кроз вријеме ради праћења кретања сваког појединачног возила. Циљ праћења је повезивање резултата препознавања у узастопним фрејмовима ради формирања трајекторија кретања.
Праћење се заснива на просторном повезивању резлтата препознавања у 3D простору, при чему се резултати у два узастопна кадра повезују ако су међусобно довољно близу. Овакав приступ омогућава очување континуитета трајекторија и у ситуацијама краткотрајних пропуста у препознавању, који се јављају услед заклањања, промјене угла или повећане густине саобраћаја. Добијене трајекторије представљају основу за даље кораке анализе, а прије свега за поуздано бројање возила, јер омогућавају јасну идентификацију пролазака кроз дефинисане зоне или линије у сцени.

2.6. Бројање возила

Бројање возила заснива се на анализи трајекторија и евидентирању пролазака возила кроз унапријед дефинисане виртуелне линије или зоне у простору. Када трајекторија возила пресјече задату линију у одређеном смјеру, тај догађај се региструје као један пролаз.
Да би се избјегло дупло бројање, за води рачуна о већ евидентираним проласцима, тако да исти објекат може бити регистрован само једном по линији. Овакав приступ, који се ослања на континуитет трајекторије, омогућава стабилно и поуздано бројање у различитим сценаријима, укључујући случајеве са више трака и повећаном густином саобраћаја.

3. РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗА

Тестирање предложеног система спроведено је на серијама снимака добијеним са фиксне сензорске поставке на реалним локацијама. У свим тестним случајевима панораме су успјешно генерисане из E57 записа, YOLO модел је препознавао возила са стабилним граничним оквирима, а након 2D→3D пројекције и угловног филтрирања издвојени су компактни 3D облаци тачака који одговарају структурама возила. Визуелна провјера резултата у PCD и E57 формату потврдила је поуздану просторну изолацију препознатих возила.
Тестни скуп обухвата укупно 48 случајева, 2521 фрејм, 326 јединствених возила и 99 пролазака кроз зону бројања. Сценарији су подијељени у пет група које одражавају различите услове саобраћаја и перцепције, укључујући варијације у густини саобраћаја, присуство заклањања и отежане услове посматрања. Основна статистика по групама сценарија приказана је у Табели 1, која показује уравнотежену заступљеност различитих типова сцена у анализи.

Табела 1. Преглед сценарија

Сценарио	Број случајева	Број узорака	Број возила
Мала густина	10	430	46
Средња густина	10	509	64
Висока густина	10	541	88
Оклузије и интеракције	10	554	72
Изазовни сценарији	8	487	56
Укупно	48	2521	326

Резултати препознавања анализирани су упоређивањем са референтним анотацијама при чему су одређени тачно позитивни, лажно позитивни и пропуштене резултати препознавања. На нивоу цјелокупног скупа података систем је остварио 4617 тачно позитивних, 78 лажно позитивних и 824 пропуштених резултата препознавања. Перформансе су оцјењене коришћењем стандардних метрика: прецизност и одзив, док F1 мјера представља њихову комбинацију. AvgIoU мјери преклапање између препознатих и референтних региона, MOTA означава тачност праћења више објеката, а CntAcc тачност бројања возила. Из добијених вриједности израчунате су метрике прецизности, одзива и F1 мјере, док је просторна тачност додатно потврђена високом просјечном IoU вриједношћу.
Резултати по појединачним групама сценарија приказани су у Табели 2. Најбоље перформансе остварене су у сценаријима са малом густином саобраћаја, гдје су возила јасно просторно раздвојена и нема израженог међусобног заклањања. У овим условима систем показује стабилно праћење и високу тачност бројања. Са порастом густине саобраћаја уочава се постепен пад одзива и стабилности праћења, док прецизност препознавања остаје висока кроз све сценарије.
Највећи изазов за систем представљају сценарији са заклањањем и интеракцијама возила. У оваквим условима долази до чешћих губитака идентитета током праћења, што се директно одражава на ниже MOTA вриједности и смањену тачност бројања, како је приказано у Табели 2. Ови резултати указују да је заклањање кључни фактор деградације перформанси система, прије свега у сегменту праћења.
Сценарији са отежаним условима перцепције показују нешто боље понашање у односу на сценарије са израженим заклањањем, али је и даље присутан пад одзива и стабилности праћења.

Табела 2. Резултати по сценаријима

Сценарио	Прецизност	Одзив	F1 мјера	AvgIoU	MOTA	CntAcc
Мала густина	0.9956	0.9496	0.9720	0.9512	0.9391	1.0000
Средња густина	0.9852	0.8911	0.9358	0.8984	0.8530	0.9474
Висока густина	0.9780	0.8403	0.9039	0.8625	0.7744	0.9000
Оклузије и интеракције	0.9794	0.8100	0.8867	0.8658	0.7179	0.8649
Изазовни сценарији	0.9890	0.8354	0.9057	0.8506	0.7733	0.9474

То указује да неповољни услови посматрања и смањен квалитет улазних података углавном утичу на континуитет трајекторија, док је само препознавање возила у већој мјери очувано.

У цјелини посматрано, добијени резултати показују да предложени систем веома поуздано рјешава препознавање и просторну локализацију возила у различитим условима саобраћаја. Главна ограничења повезана су са праћењем у сложеним сценама, што се затим директно одражава и на тачност бројања. Ипак, резултати потврђују да је систем већ у садашњем облику употребљив за практичне системе надзора саобраћаја, уз јасан простор за даље унапређење робусности праћења.

4. ЗАКЉУЧАК

У овом раду представљен је практичан приступ фузији камера и LiDAR сензора за потребе надзора друмског саобраћаја. Комбиновањем резултата 2D препознавања са панорамских снимака и 3D информација из облака тачака постигнуто је поузданије издвајање возила у поређењу са коришћењем само једног сензорског модалитета. Филтрирање засновано на просторним угловима омогућава задржавање само релевантних тачака, чиме се поједностављују и унапређују даљи кораци праћења и бројања.

Предложени поступак ослања се на јасно дефинисан и модуларно организован ланац обраде, од генерисања панораме и YOLO препознавања до пројекције, филтрирања и чувања резултата у E57/PCD форматима. Такав приступ омогућава лаку контролу квалитета и адаптацију параметара различитим условима саобраћајних сцена, укључујући повећану густину саобраћаја и присуство заклањања.

Резултати потврђују да фузија сензора доприноси стабилнијем и поузданијем надзору возила, што је посебно значајно у системима за аутоматско бројање и анализу протока саобраћаја. Као правци будућег рада издвајају се унапређење праћења, класификација типова возила на основу 3D карактеристика и оптимизација система за рад у реалном времену.

5. ЛИТЕРАТУРА

[1] A. Sochaniwsky et al., „*A Camera–LiDAR Fusion Framework for Traffic Monitoring*”, IEEE ITEC, 2024. Доступно: https://ieeexplore.ieee.org/document/10598852. Приступљено: Feb. 2026.

[2] L. Wang, Y. Huang, „*LiDAR–camera fusion for road detection using a recurrent CRF model*”, Scientific Reports, 2022. Доступно: https://www.nature.com/articles/s41598-022-14438-w.pdf. Приступљено: Feb. 2026.

[3] A. Ansari, B. R. Kadali, „*Real-time traffic data collection using roadside LiDAR: a novel background filtering approach*”, Innovative Infrastructure Solutions, 2025. Доступно: https://link.springer.com/article/10.1007/s41062-025-02284-4. Приступљено: Feb. 2026.

[4] C. Lin, G. Sun, D. Wu, C. Xie, *„Vehicle Detection and Tracking with Roadside LiDAR Using Improved ResNet18 and the Hungarian Algorithm”,* Sensors, vol. 23, no. 19, 2023. Доступно: https://www.mdpi.com/1424-8220/23/19/8143. Приступљено: Feb. 2026.

[5] L. Huang, W. Huang, *„RD YOLO: An Effective and Efficient Object Detector for Roadside Perception Systems”,* Sensors, vol. 22, no. 21, 2022. Доступно: https://www.mdpi.com/1424-8220/22/21/8097. Приступљено: Feb. 2026.

Кратка биографија:



Слађана Симић рођена је у Ужицу 2000. год. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Рачунарства у аутоматике – Аутомобилски софтвер одбранила је 2026.год.

Контакт:sladjana.virijevic00@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 4.3
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36BE63Lazic

Симулација компромиса у дизајну лидара за анализу саобраћаја пре производње сензора

Simulating LIDAR Design Tradeoffs for Traffic Analytics Before Sensor Production

Теодора Лазић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – РАЧУНАРСТВО И АУТОМАТИКА

Кратак садржај – *У овом раду представљена је методологија за симулацију и анализу различитих подешавања лидар сензора у контексту саобраћајне аналитике. Полазна основа представља обраду реалних облака тачака, њихова трансформација у сферни координатни систем и издвајање региона од интереса који одговарају препознатим возилима. Кроз симулацију различитих параметара сензора, анализиран је њихов утицај на количину и квалитет задржаних података. Добијени резултати показују како промене подешавања сензора утичу на перформансе саобраћајне аналитике пре саме производње уређаја.*
Кључне речи: *лидар, симулирање сензора, облак тачака, препознавање возила, просторна резолуција*

Abstract – *This paper presents the metodology for a simulation and analysis of different LiDAR sensor's configurations in the context of traffic analytics. The starting point is the processing of real point clouds, their transformation in spherical coordinate system and the extraction of regions of interest corresponding to the detected vehicles. Through the simulation of various sensor parameters, their impact on the quantity and quality of the retained data was analyzed. The obtained results show how changes in sensor configuration affect the performance of traffic analytics before the device is manufactured.*

Keywords: *LiDAR, sensor simulation, point cloud, vehicle detection, spatial resolution*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Ненад Четић, доцент.

1. УВОД

Лидар (енг. LiDAR - Light Detection and Ranging) технологија представља важну сензорску платформу у савременим системима за праћење саобраћаја и анализу окружења. Генерисањем тродимензионалних облака тачака омогућава прецизно препознавање и локализацију објеката у реалном времену. Параметри сензора, попут просторне резолуције, максималног домета и видног поља, значајно утичу на количину и квалитет прикупљених података.

Циљ овог рада је симулација утицаја различитих лидар параметара на квалитет и обим података релевантних за саобраћајну аналитику, применом алгоритама за трансформацију координата, филтрирање региона од интереса и контролисану измену параметара сензора на реалним облацима тачака.

2. КОНЦЕПТ И ЗНАЧАЈ СИМУЛАЦИЈЕ ЛИДАР СЕНЗОРА

2.1. Теоријске основе лидар сензора

Лидар представља активну сензорску технологију засновану на емитовању ласерских импулса и мерењу времена њиховог повратка након рефлексије од објеката у окружењу. На основу времена проласка сигнала израчунава се растојање до објекта, што омогућава формирање тродимензионалне репрезентације простора у облику облака тачака [1].

2.2. Параметри дизајна лидар система

Избор параметара представља кључни инжењерски компромис између резолуције, домета, поузданости препознавања, количине генерисаних података и цене уређаја. Описани су најзначајнији параметри који дефинишу карактеристике лидар сензора, односно, просторна резолуција, домет, видно поље, број ласерских канала, брзина скенирања и тачност и шум мерења.

2.3. Значај симулације пре производње

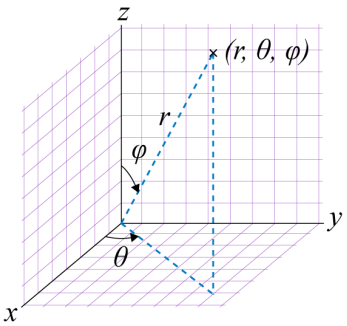
Симулација не замењује физичко тестирање, али представља кључни корак у процесу оптимизације дизајна, јер омогућава систематску анализу параметара у контролисаном и репродуктивном окружењу. Савремени приступи, као што је *LiDARsim*, користе комбинацију физички заснованог моделовања и машинског учења ради генерисања реалистичних лидар облака тачака у виртуелним окружењима. За разлику од таквих приступа, у овом раду симулација се заснива на модификацији реално измерених облака тачака, чиме се омогућава анализа утицаја параметара сензора на процес саобраћајне аналитике без потребе

за сложеним моделовањем окружења и процеса мерења [2].

3. СИМУЛАЦИЈА ПАРАМЕТАРА ЛИДАР СЕНЗОРА

3.1. Припрема података и координатна трансформација

У циљу симулације параметара сензора који су директно повезани са угаоним карактеристикама емитовања ласерских зрака (азимут, елевација, видно поље), извршена је трансформација Декартових координата у сферни координатни систем. Оваква репрезентација омогућава примену алгоритама развијених за 2D слике, што је искоришћено и у радовима као што је *RangeNet++*, где се сферна пројекција користи као улаз у конволутивне неуронске мреже за семантичку сегментацију лидар података [3].



Слика 1. Конверзија просторних координата у сферне координате [4]

На слици 1. је графички приказана конверзија просторних координата у сферне координате, а математички изрази за израчунавање су приказани испод (1), (2) и (3).

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \tag{1}$$

$$\theta = arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \tag{2}$$

$$\phi = arccos\left(\frac{Z}{r}\right) \tag{3}$$

где је:
r - домет (енг. *range*), односно удаљеност тачке од сензора,
θ - азимутални угао (хоризонтална ротација),
ϕ - елевациони угао (вертикално одступање).

Из сферних координата лидар облака генерише се панорамска слика која представља 360° хоризонтални приказ окружења. Овако добијена панорама служи као улаз за алгоритам препознавања објеката у 2D домену. На панорамским снимцима примењује се *YOLO* алгоритам препознавања објеката, који идентификује возила и формира граничне оквире (енг. *bounding box*) са проценом поузданости.

3.2. Симулација просторне резолуције

Простор се дели на правилну тродимензионалну мрежу кубичних ћелија тј. воксела (енг. *voxel*) димензије v. Све тачке које припадају истом вокселу замењују се једном репрезентативном тачком, најчешће њиховим центроидом. За тачку (X,Y,Z), индекс воксела одређује се као што је приказано у изразу (4):

$$i = \left\lfloor \frac{X}{v} \right\rfloor, j = \left\lfloor \frac{Y}{v} \right\rfloor, k = \left\lfloor \frac{Z}{v} \right\rfloor \tag{4}$$

Све тачке са истим индексом (i,j,k) групишу се у једну ћелију. Репрезентативна тачка се израчунава као што је приказано изразима (5), (6) и (7):

$$Xc = \left(\frac{1}{n}\right)\sum Xi \tag{5}$$

$$Yc = \left(\frac{1}{n}\right)\sum Yi \tag{6}$$

$$Zc = \left(\frac{1}{n}\right)\sum Zi \tag{7}$$

где је n број тачака унутар посматраног воксела. Величина воксела v представља контролни параметар симулације. У контексту урбаних саобраћајних сцена, типичне вредности могу се груписати на следећи начин:

- **v = 0.01 m (1 cm)**
  Врло фина просторна репрезентација. Задржава већину геометријских детаља, погодна за анализу облика возила и прецизнију сегментацију. Симулација високорезолуционог лидар система.
- **v = 0.02 m (2 cm)**
  Умерена редукција броја тачака уз очување основне геометрије возила, погодна за анализу компромиса између перформанси и количине података.
- **v = 0.03 (3 cm)**
  Израженија редукција густине тачака, при чему се задржава глобална форма већих објеката, уз могућ губитак ситних детаља.
- **$v \geq$ 0.05 m (5 cm и више)**
  Агресивна редукција која доводи до приметног губитка финијих детаља, нарочито на ивицама и мањим елементима. Симулација сензора ниже просторне резолуције.

3.3. Симулација ограничења домета

Већи домет омогућава раније уочавање објеката, али:

- повећава количину података,
- захтева већу снагу и потрошњу енергије,
- може увести више шумова на великим удаљеностима.

Мањи домет смањује количину података и хардверске захтеве, али ограничава просторну покривеност.
Симулација ограничења домета заснива се на једноставном услову (8):

$$r \leq R_{max} \tag{8}$$

где је R_{max} максимални домет симулираног сензора. Тачке које не задовољавају овај услов се уклањају из облака.

3.4. Симулација угаоне покривености

У реалним системима, лидар сензори могу имати пуну 360° хоризонталну покривеност (ротациони сензори), али и ограничен азимутални опсег, у зависности од конструкције и намене. Симулација ограничене азимуталне покривености реализована је дефинисањем интервала (9):

$$\theta \in [\theta_{min}, \theta_{max}] \quad (9)$$

где је θ азимутални угао сваке тачке у сферном координатном систему. Тачке чији азимут не припада дефинисаном интервалу елиминишу се из облака.
Поред хоризонталне покривености, значајан параметар је и вертикално видно поље, које дефинише опсег елевационих углова у коме сензор региструје повратни сигнал. Вертикално видно поље се дефинише као (10):

$$\varphi \in [\varphi_{min}, \varphi_{max}] \quad (10)$$

где је φ елевациони угао тачке. Симулација се врши елиминацијом тачака чија елевација не припада задатом интервалу. Са аспекта пројектовања лидар сензора, анализа ових параметара је од изузетног значаја јер омогућава одређивање минималне неопходне угаоне покривености која обезбеђује поуздано препознавање возила, уз истовремено смањење комплексности и цене будућег уређаја.

3.5. Филтрирање објеката од интереса

Након што је завршено препроцесирање облака тачака, долазимо до последњег дела, а то је провера утицаја промењених параматера на само препознавање објеката од интереса. Координате 2D оквира пресликавају се у одговарајуће опсеге сферних углова. На основу добијених угаоних граница формира се логичка маска над прерађеним облаком тачака, која задржава само оне 3D тачке чији азимут и елевација припадају дефинисаном опсегу. На овај начин се из почетног облака издваја подскуп тачака који просторном пројекцијом одговара препознатим возилима. Филтрирање 3D тачака на основу 2D препознавања подразумева више геометријских трансформација, што може довести до нумеричких и геометријских проблема, као што су:

- неслагање координатних система
- дискретизација и гранични ефекти
- проблем преласка преко границе 0 - 2π
- утицај просторне редукције

4. РЕЗУЛТАТИ

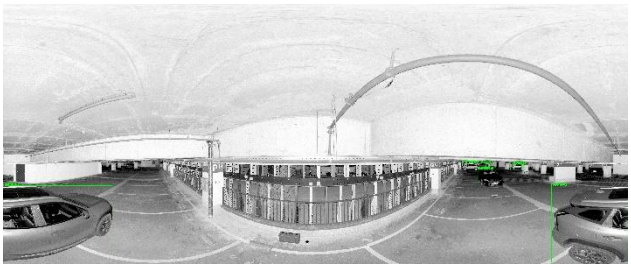
4.1. Утицај просторне резолуције

У оквиру експерименталног дела рада анализиран је утицај просторне резолуције облака тачака на успешност издвајања објеката од интереса. Просторна резолуција симулирана је применом вокселског смањења узорковања са различитим величинама воксела. Промена параметра v представља апстрактни модел измене хардверске конфигурације сензора.

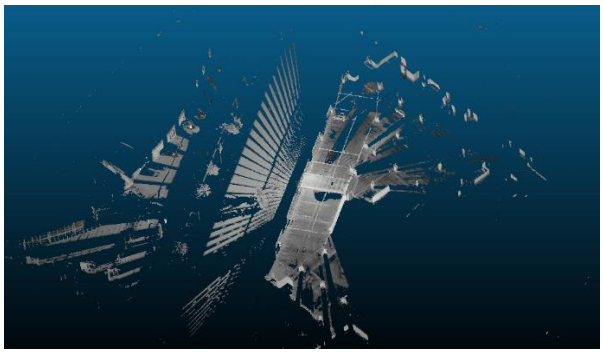
- **Практична имплементација**

Првобитна имплементација вокселског смањења узорковања је одрађена уз помоћ *numpy* библиотеке јер чува све сферне координате. После успешно одрађеног препроцесирања, на ред долази креирање новог E57 фајла уз помоћ функције *pye57.write_scan_raw()*, међутим долази до губитка сферних координата, односно, сама функција не прави фајл са сферичном структуром. Пошто нам је неопходно да се сачувају сферне координате које се после користе за филтрирање, настаје идеја да се оне израчунавају на основу картизијанских координата. Због оптимизације времена извршавања препроцесирања, настаје имплементација вокселског смањења узорковања уз помоћ *open3d* библиотеке, широко прихваћеног open-source оквира за обраду 3D података који пружа ефикасне алгоритме за рад са облацима тачака, мрежама и RGB-D подацима [5].
Експерименти су спроведени над већим бројем скенова али за потребе рада ће бити приказани резултати примене смањења узорковања над четири скена:

- **scan001** (3 препозната возила),
- **scan004-2m** (6 препознатих возилаanali је на облаку тачака одсечено све даље од 2m удаљености)
- **scan004** (6 препознатих возила)
- **scan008** (5 препознатих возила).



Слика 2. Панорама извучена из скена број 004 (за скен 004-2m је иста)



Слика 3. Пример облака тачака скена број 004

На слици 2. имамо два возила која се налазе у крупном кадру, односно налазили су се близу самог сензора у току мерења, као и четири возила на десној половини слике која су у даљини али ипак препозната на панорами, а на слици 3. је облак тачака из којег је извучена панорама. Аутомобили који су ближе сензору обухватају много више простора на панорами, а самим тим и тачака унутар облака тачака, те чак смањивање резолуције на агресивнији начин би оставило довољно

података за њихово препознавање. Овај закључак дефинитивно не можемо да имамо када су у питању возила која се налазе у даљини.

Табела 1. Приказ приближне редукције након обраде облака

Величина воксела при смањењу узорковања	Приближна редукција
5cm	99%
3cm	98.5%
2cm	97.3%
1cm	93.5%

Након примене првобитног филтера возила, ни за једно возило нису пронађене тачке у облаку, те је било неопходно извршити одређени број корекција које су описане у наредном поглављу. Након њиховог додавања, добијени су следећи резултати.

- **scan001** - 2/3 препозната возила,
- **scan004-2m -** 0/6 препознатих возила,
- **scan004** - 3/6 препознатих возила,
- **scan008 -** 2/5 препозната возила.

Иако је број тачака изузетно редукован у сваком скену, што приказује Табела 1, филтрирање је дало исте резултате за све величине воксела. То указује да на успешност издвајања возила није пресудно утицала сама просторна резолуција, већ пре свега положај возила у односу на сензор и његова угаона величина на панорами.

При резолуцији од 2 cm успешно су издвојена два возила у блиском плану, док удаљенија и мања возила нису задржала довољан број тачака након прорећивања. Разлог је што густина лидар мерења природно опада са растојањем услед фиксног угаоног корака скенирања.

При резолуцији од 1 cm задржан је већи број тачака по возилу, што је довело до стабилнијег филтрирања прва два возила у кадру.

Посебно је интересантан скен 004-2m, код којег су из облака тачака уклоњене све тачке удаљене више од 2 m од лидара. Иако би се очекивало боље препознавање објеката у блиском плану, након филтрирања није успешно издвојено ниједно возило, вероватно зато што се већина возила налазила изван задатог домета.

4.2. Геометријска корекција и стабилизација филтрирања

- **Инверзија угаоних оса**

Панорамска слика представља 360° пројекцију сцене, али са хоризонталним огледањем (енг. *mirroring*). Због тога је било неопходно извршити инверзију азимуталног угла приликом пресликавања 2D координата граничних оквира у сферни координатни систем.

- **Провера опсега азимута**

Додатно је уведена провера да ли опсег азимута прелази границу од 0/2π. У случајевима када гранични оквир пресеца угаону границу, класична провера опсега није довољна, те је имплементирана условна логика која омогућава исправно филтрирање и у том сценарију. Овај корак је спречио губитак тачака у ситуацијама када се возило налази близу угаоног прелаза.

- **Угаоно проширење**

У циљу повећања стабилности филтрирања, уведено је умерено угаоно проширење (енг. *padding*) азимуталног и елевационог опсега. Разлог за ово је чињеница да гранични оквир у 2D домену не представља савршено прецизну пројекцију 3D објекта, као и да вокселско смањење узорковања може довести до губитка граничних тачака.

5. ЗАКЉУЧАК

У овом раду приказан је приступ симулацији компромиса у дизајну лидар сензора за примене у саобраћајној аналитици, са циљем процене утицаја кључних параметара пре саме производње уређаја. Посебна пажња посвећена је симулацији смањења просторне резолуције применом методе вокселског смањења узорковања, као и геометријској корекцији и стабилизацији филтрирања. Показано је да промене величине воксела директно утичу на број задржаних тачака и детаљност репрезентације објеката, што је значајан фактор при пројектовању система за препознавање и праћење возила.

Добијени резултати указују да је могуће симулирати утицај дизајнерских одлука (резолуција, угаона покривеност, домет) над постојећим лидар подацима и на тај начин проценити потенцијалне перформансе система пре његове реализације.

6. ЛИТЕРАТУРА

[1] Santiago Royo, Maria Ballesta-Garcia, *An Overview of Lidar Imaging Systems for Autonomous Vehicles,* 2019

[2] Sivabalan Manivasagam, Shenlong Wang, *LiDARsim: Realistic LiDAR Simulation by Levaraging the Real World*.

[3] Andres Milioto, Ignazio Vizzo, Jens Behley, Cyrill Stachniss, *RangeNet++: Fast and Accurate LiDAR Semantic Segmentation*

[4] https://cdn1.byjus.com/wp-content/uploads/2019/

[5] Quin-Yi Zhou, Jaesik Park, Vladlen Koltun, Intel Labs, *Open3D: A Modern Library for 3D Data Processing*

Кратка биографија:



Теодора Лазић рођена је у Зрењанину 2000. год. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Електротехнике и рачунарства – Рачунарска техника и рачунарске комуникације одбранила је 2026.год.

Контакт: tmijovic108@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 624.01
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36CG01Popovic

Процена стања и санација АБ конструкције јавног објекта у Новом Саду

The Assessment and Repair of RC Structure of Public Building in Novi Sad

Милутин Поповић, Слободан Шупић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ГРАЂЕВИНАРСТВО

Кратак садржај: *Рад се састоји из истраживачког и стручног дела. У истраживачком делу је дат осврт на врсте и утицај дефеката на трајност АБ конструкција. У стручном делу је урађена процена стања АБ конструкције јавног објекта у Новом Саду. Како би се утврдио степен оштећења и дао предлог санационих радова, спроведен је детаљан визуелни преглед свих доступних елемената конструкције. На основу анализе регистрованих дефеката и оштећења, резултата теренских и лабораторијских испитивања,, дат је предлог санационих мера у циљу обезбеђења носивости и трајности конструкције.*

Кључне речи: *Процена стања, санација, АБ, јавни објекат.*

Abstract: *The study consists of a research part and a professional (practical) part. The research part provides an overview of the types of defects and their impact on the durability of reinforced concrete (RC) structures. In the professional part, an assessment of the condition of an RC structure of a public building in Novi Sad is presented. In order to determine the level of damage and propose appropriate repair measures, a detailed visual inspection of all accessible structural elements was conducted. Based on the analysis of the identified defects and damages, as well as the results of field and laboratory testing, a set of repair measures was proposed with the aim of ensuring the load-bearing capacity and durability of the structure.*

Keywords: *Assessment, repair, RC, public building.*

НАПОМЕНА: Овај рад је проистекао из мастер рада, чији је ментор др Слободан Шупић, ванредни професор.

1. УВОД

Дефекти у бетону и армиранобетонским (АБ) конструкцијама представљају значајан фактор који директно утиче на трајност, функционалност и поузданост објеката. Њихов значај огледа се у томе што могу довести до повећане пропустљивости бетона, убрзаног продора агресивних агенаса и иницирања процеса деградације, као што је корозија арматуре. Иако неки дефекти имају искључиво естетски карактер, велики број њих може озбиљно угрозити дугорочну експлоатацију конструкције.

Превенција дефеката подразумева свеобухватан приступ који обухвата правилно пројектовање бетонске мешавине, избор квалитетних материјала, адекватну припрему и извођење радова, као и контролу процеса уградње, компактирања и неге бетона. Посебан значај има поштовање технолошких процедура и стандарда, јер се већина дефеката може спречити правовременом контролом и пажљивим извођењем. На тај начин се обезбеђује дуготрајност и сигурност бетонских конструкција.

Посебно је важно напоменути да су дефекти често присутни код старијих објеката, изграђених у периоду када правила армирања нису била довољно развијена, а стандарди пројектовања и извођења нису били на нивоу данашњих захтева.

У раду је дата процена стања јавног објекта у Новом Саду, који је деценијама у фази експлоатације, те су се током времена, услед изложености дејству атмосферилија и детериорационим процесима, на елементима носеће АБ конструкције испољили бројни дефекти и оштећења.

2. ОСНОВНИ ПОДАЦИ О ОБЈЕКТУ

Грађење јавног комплекса у Новом Саду, који је предмет рада, а састоји се из четири повезане ламеле, започето је крајем 1988. године, а прекинуто је 1992. године. У том периоду изведени су готово сви АБ радови на носећој конструкцији ламела А, В и С, као и шипови за ламелу "D". Током 2008-2009. завршена је реконструкција ламеле А, док је АБ конструкција ламела В и С остала незаштићена и директно изложена "зубу" времена све до данашњих дана.

Ради утврђивања стварног стања носеће АБ конструкције ламеле В2-С2, након вишедеценијске изложености утицају атмосферилија и детериорационим процесима и дефинисања евентуално потребних специфичних радова на санацији, предвиђено је да се обави детаљан преглед доступних

елемената носеће АБ конструкције, што је предмет овог мастер рада.

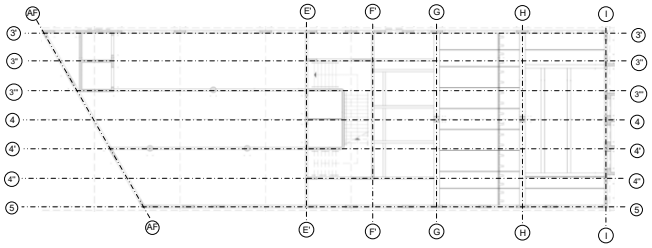
Носећа конструкција објекта је изведена као полумонтажна армиранобетонска конструкција. Са аспекта носећих вертикалних елемената, носећа конструкција је скелетна, укрућена са зидним платнима. Елементи носеће АБ конструкције ламеле B2-C2 су: стубови, главне попречне греде, главне подужне греде, секундардне греде, таванице од ТТ коруба, таваница типа пуне плоче и зидна платна. На основу анализе доступне пројектно-техничке документације, утврђено је да су за носећу конструкцију ламеле B и C одабране следеће врсте бетона:

- Бетон МБ 35 за АБ носеће елементе (стубови, греде, монолитне плоче и зидна платна),
- Бетон МБ 40 за префабриковане делове међуспратних таваница (ТТ корубе).

Општи изглед објекта је приказан на наредној Слици 1, а основа ламеле B2-C2 са ознакама оса на Слици 2.



Слика 1. Општи изглед објекта



Слика 2. Основа ламеле B2-C2 са ознакама оса

3. ДЕТАЉАН ВИЗУЕЛНИ ПРЕГЛЕД АБ КОНСТРУКЦИЈЕ

Резултати визуелног прегледа су систематизовани по елементима АБ конструкције и биће приказани у наставку за поједине елементе.

3.1. АБ фасадна зидна платна

Карактеристични дефекти АБ фасадних платана су:

- недовољна дебљина заштитног слоја (Слике 3-6),
- видљива арматура (Слике 3-6),
- бетонска гнезда (Слика 4),
- порозан бетон.

и следећа оштећења:

- мрежасте прслине,
- корозија арматуре (Слике 3-6),
- одвајање и отпадање заштитног слоја бетона (Слика 3),
- биолошка корозија.



Слика 3. Пуцање и отпадање заштитног слоја бетона, јака корозија узенгија



Слика 4. Бетонска гнезда на спољашњој страни фасадног платна



Слика 5. Неправилно постављена арматура у зони споја платна и темељне греде



Слика 6. Корозија арматуре, пуцање и отпадање заштитног слоја бетона, кратки елемент

3.2. АБ стубови

Визуелним прегледом АБ стубова регистровани су следећи карактеристични дефекти:

- мала дебљина заштитног слоја бетона,
- линијска сегрегација,
- бетонска гнезда.

и следећа карактеристична оштећења:

- корозија арматуре,
- одвајање и отпадање бетона услед бубрења кородирале арматуре.

На наредним сликама илустровани су карактеристични дефекти и оштећења



Слика 7. Изглед кружног монолитног стуба, порозан заштитни слој бетона



Слика 8. Мали заштитни слој бетона, видљиве кородирале узенгије, пуцање и отпадање заштитног слоја бетона

3.3. АБ примарне греде

Примарне греде у оси X су изведене као полумонтажне и формиране су спрезањем доњег монтажног дела греде димензија 50x27цм и горњег дела димензија 50x48цм, бетонираног на лицу места, заједно са слојем за монолитизацију међуспратне конструкције, а остале примарне греде као монолитне правоугаоног попречног пресека, ширине 50цм и 20цм.

Карактеристичан дефект свих греда је мала дебљина заштитног слоја бетона (Слика 9), а регистрована су следећа оштећења:

- корозија узенгија (доња и бочна страна греда),
- одвајање и отпадање заштитног слоја бетона услед повећања запремине кородирале арматуре,
- трагови сливања воде



Слика 9. Недовољна дебљина заштитног слоја бетона, отпадање заштитног слоја бетона, видљиве кородирале узенгије

3.4. АБ међуспратне таванице – пуне плоче

Предметне плоче су бетониране у оплати која је формирана од дасака. Због тога је доња површина плоча изразито неравна и на њој се могу уочити остаци неуклоњене - залепљене оплате. Визуелним прегледом су обухваћене доње површине плоча. Карактеристична оштећења на плочама су прслине и пукотине, праћене траговима процуривања и излуживања – Слика 10.



Слика 10. Попречна прслина на месту арматуре, корозија арматуре у зони отвора и попречне прслине

3.5. АБ међуспратне таванице – ТТ корубе

Међуспратне таванице од ТТ коруба су изведене као спрегнуте (бетон-бетон). Префабриковани део чини армиранобетонска ТТ коруба са ребрима висине 35цм и плочом дебљине 5цм, преко које је на лицу места изабетонирана АБ плоча дебљине 8цм.

За све ТТ корубе је карактеристичан дефект недовољна дебљина заштитног слоја бетона, са местимично видљивим узенгијама ребара и попречном арматуром плоча. Танке прслине у плочи су последица недовољне дебљине заштитног слоја бетона и/или скупљања услед сушења. Подужне прслине на споју ребара и плоче су променљиве дужине (од 1м до дужине целог распона корубе), понекад су праћене траговима процуривања воде и испирањем $Ca(OH)_2$. Постоје са обе стране ребра и уочене су на већини ребара.



Слика 11. Коса пукотина у углу конзолног дела плоче корубе

4. НАКНАДНО УТВРЂИВАЊЕ КВАЛИТЕТА БЕТОНА

Ради одређивања стварних чврстоћа при притиску бетона уграђеног у носеће елементе АБ конструкције, обављено је вађење бетонских језгара. Осим за оцену чврстоће бетона при притиску, језгра су послужила и за детекцију евентуалне макроскопске порозности бетона, као и унутрашњег раслојавања бетона и/или унутрашњих прслина, као и за одређивање дебљине карбонатизованог слоја бетона. Укупно је извађено 18 бетонских језгара: шест језгара из АБ стубова, шест језгара из АБ греда и АБ монолитних плоча и шест

језгара из АБ зидних платана. Резултати су дати у наредној Табели.

Табела 1. Средње вредности чврстоће при притиску бетона и пројектована марка бетона

Елемент конструкције	Средња вредност чврстоће при притиску (МПа)	Пројектована МБ
АБ стубови	59.9	МБ35
АБ греде и монолитне плоче	86.3	МБ35
АБ зидна платна	58.3	МБ35

Анализом добијених вредности чврстоћа бетона при притиску на дан испитивања, може се закључити да су средње и минималне вредности чврстоћа бетона при притиску у испитиваним елементима носеће АБ конструкције значајно више од карактеристичних вредности за пројектовану МБ, па се при евентуалној санацији или прорачуну за доказ носивости испитиваних елемената носеће АБ конструкције, може усвојити пројектована МБ35.



Слика 12. Преглед и обележавање извађеног бетонског језгра

5. ЗАКЉУЧАК О СТАЊУ КОНСТРУКЦИЈЕ И ПРЕПОРУКЕ ЗА САНАЦИЈУ

Визуелним прегледом елемената АБ конструкције, утврђено је да су се током вишегодишње експлоатације и неодржавања испољили бројни дефекти и оштећења. Набројани детериорациони фактори редукују трајност конструкције, док су стабилност и носивост конструкције и даље очувани, што су потврдиле високе механичке карактеристике на извађеним језгрима. У циљу обезбеђења носивости и трајности елемената АБ конструкције, потребно је да се изведу две групе санационих радова, које се генерално могу сврстати у конструкцијску и неконструкцијску санацију.

Неконструкцијска санација укључује следеће радове:

- Чишћење и заштита кородиралих шипки и репрофилација оштећеног бетонског пресека.
- Извођење новог заштитног слоја на елементима на којима је регистрована општа корозија арматуре.
- Импрегнација инхибиторима корозије на спољашњим површинама елемената.
- Репрофилација елемената на којима су регистрована механичка оштећења.

Конструкцијска санација обухвата:

- Инјектирање прслина и пукотина у бетону које пролазе целом дебљином плоча.
- Локално ојачање плоча коруба са доње стране у зонама са косим пукотинама и издробљеним бетоном.

6. ЛИТЕРАТУРА

[1] Проф. др Данијел Кукарас, Проф. др Слободан Шупић, предавања са предмета “Трајност и процења стања бетонских конструкција”, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2026.

[2] Проф. др Данијел Кукарас, Проф. др Иван Лукић, Проф. др Слободан Шупић, предавања са предмета “Санација бетонских конструкција”, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2026.

[3] СРПС ЕН 1504-10:2017: Производи и системи за заштиту и санацију бетонских конструкција – Дефиниције, захтеви, контрола квалитета и вредновање усаглашености – Део 10: Примена производа и система на терену и контрола квалитета радова.

Кратка биографија:



Милутин Поповић, рођен је 10.10.1992. године у Требињу. Основне академске студије грађевинарства на Департману за грађевинарство и геодезију Факултета техниких наука у Новом Саду завршио је 2016. године, а мастер рад из области Процене стања и санације бетонских конструкција брани 2026. године.
Контакт: milutinp992@gmail.com



Слободан Шупић рођен је 1989. године у Требињу у БиХ. Од 2013. године запослен је на Факултету техничких наука, а од 2025. ради као ванредни професор на Департману за грађевинарство и геодезију, ужа научна област: Грађевински материјали, процјена стања и санација конструкција.

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 656.11.021
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36CG02Pavlovic

Примена раскрсница са кружним током саобраћаја у циљу управљања брзинама на саобраћајној мрежи

The applicaton of roundabouts as a measure for speed management on the urban road network

Исидора Павловић, Милош Шешлија, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм - ГРАЂЕВИНАРСТВО

Кратак садржај – *У раду је приказана примена раскрсница са кружним током саобраћаја у циљу управљања брзинама на саобраћајној мрежи града Сремска Митровица. Анализирани су основни принципи планирања и пројектовања саобраћајница у урбаним срединама, са посебним освртом на геометријске елементе који утичу на режим брзина у зони раскрсница. Приказана је постојећа структура саобраћајне мреже и идентификовани су проблеми неуједначених брзина проузроковани геометријом раскрсница. На основу дефинисаних критеријума извршен је избор приоритетних локација за реконструкцију у кружне раскрснице и предложени су одговарајући типови решења. Рад садржи и анализу постојеће кружне раскрснице, у оквиру које су приказани ситуациони план, нивелационо решење, као и подужни и попречни профили.*

Кључне речи: *Површинске раскрснице, кружне раскрснице, управљање брзинама*

Abstract – *This thesis presents the application of roundabouts as a traffic speed management measure within the urban road network of the City of Sremska Mitrovica. The fundamental principles of urban road planning and design are examined, with particular emphasis on the geometric design elements that influence vehicle operating speeds in intersection areas. The existing structure of the urban road network is presented, and locations characterized by inconsistent speed patterns resulting from intersection geometry are identified. Based on the defined evaluation criteria, priority locations for reconstruction into roundabouts were selected, and appropriate roundabout configurations were proposed. The thesis also includes a detailed analysis of an existing roundabout, comprising its horizontal alignment, vertical alignment design, as well as longitudinal and cross-sectional profiles.*

Keywords: (three to five): *At-grade intersections, roundabout design elements, speed management*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Милош Шешлија, ванр. проф.

1. УВОД

Планирање и пројектовање саобраћајница у урбаним срединама представља сложен процес, а раскрснице представљају његове најосетљивије тачке. Њихова геометрија директно утиче на токове саобраћаја и режиме брзина. У савременој пракси, кружне раскрснице се издвајају као ефикасно решење управо зато што управљање брзином не заснивају на саобраћајним знацима и сигнализацији, већ на геометријском обликовању простора. Циљ овог рада јесте да се дефинишу критеријуми за избор локација и предложе геометријски типови кружних раскрсница на местима где би њихова примена могла допринети постизању контролисаних и уједначених режима брзина [1, 2].

2. АНАЛИЗА ПОСТОЈЕЋЕГ СТАЊА САОБРАЋАЈА И УТИЦАЈ ГЕОМЕТРИЈЕ РАСКРСНИЦА НА РЕЖИМ БРЗИНА У УРБАНИМ УСЛОВИМА

У Сремској Митровици улична мрежа има хетерогену структуру раскрсница - и даље доминирају класичне раскрснице у нивоу, регулисане семафорском сигнализацијом или знаком првенства пролаза. Међутим, од средине 2010-их, кружни токови постају препознатљив елемент саобраћајне инфраструктуре града, посебно на примарним улазима и кључним чворовима мреже. Кружни токови, као урбанистичко-грађевинско решење, омогућавају рационалније коришћење простора раскрсница, лакше прилагођавање различитим типовима саобраћајних токова и бољу организацију кретања возила унутар града. Са становишта урбанистичког планирања, увођење већег броја кружних токова у Сремској Митровици представља пример успешне адаптације савремених решења у градовима средње величине.
Анализа постојећег стања показује да проблем неуједначених брзина у мрежи није последица недовољне сигнализације или контроле саобраћаја, већ неприкладне геометрије раскрсница, која омогућава превисоке оперативне брзине и не пружа физичке услове за њихово контролисано смањење у зони раскрснице. Због тога се као рационално решење намеће реконструкција одабраних раскрсница у

кружне токове, где се управљање брзинама остварује кроз геометријско обликовање [2, 3].

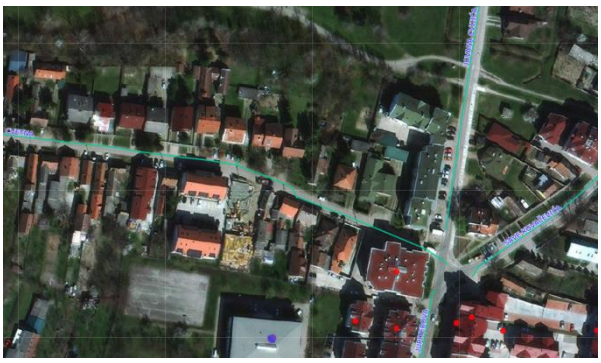
3. ИЗБОР И АНАЛИЗА ЛОКАЦИЈА ЗА ПРИМЕНУ КРУЖНИХ РАСКРСНИЦА

На основу анализа геометрије раскрсница, брзине кретања возила, саобраћајне густине и безбедности саобраћаја, изабране су приоритетне локације за трансформацију класичних раскрсница у раскрснице са кружним током. Критеријуми за одабир локација обухватају: просторну расположивост, могућност несметаног уклапања у постојећи профил улица, пролазност комерцијалних и сервисних возила, као и очекивани утицај на смањење брзина и повећање безбедности свих учесника у саобраћају. У овом раду предложени су карактеристични примери реконструкције постојећих раскрсница у раскрснице са кружним током саобраћаја на територији града Сремска Митровица. Изабрани примери показују где и који тип кружне раскрснице се може применити, у складу са просторним и саобраћајним условима. У оквиру рада разматрани су следећи примери:

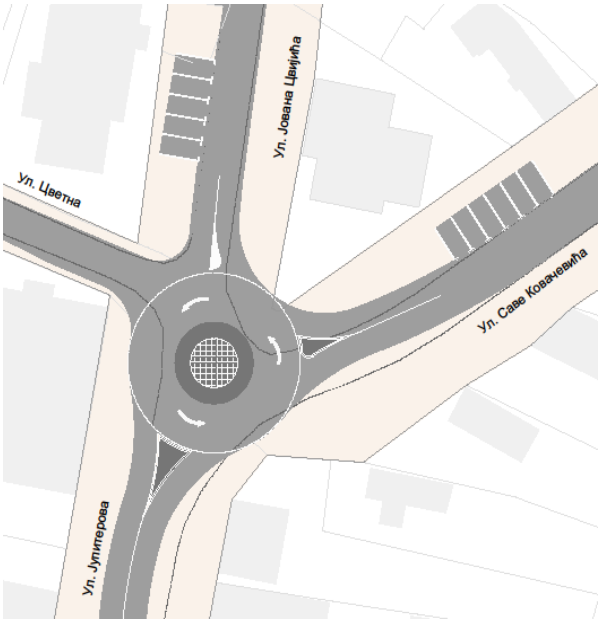
- пример локације мале компактне кружне раскрснице
- пример локације четворокраке мини кружне раскрснице
- пример локације двоструке мини кружне раскрснице

3.1. Пример локације мале компактне кружне раскрснице

Предметна локација обухвата постојећу раскрницу чија геометрија и просторна организација присупних улица нису у потпуности прилагођени савременом урбаном саобраћају. Праволинијски токови улце Јупитерова и улице Јована Цвијића омгућавају развијање брзина кретања возила које у појеиним случајевима прелазе 50 km/h. Постојеће грађевнско решење не обезбеђује јасно дефинисанезоне маневрисања, што отежава укључивање и искључивање возила са споредних пилаза. Реконструкција раскрснице у виду мале компктне кружне раскрснице предложена је као просорно-геометријско решење које омогућава измену ачина вођења саобраћајних токова кроз уоћење закривљених прилаза и централног острва. Оваква геометрија условљава смањење брзина кретања возила у зони раскрснице, без примене додатних регулативних мера. Са аспекта грађевинског инжењерства, мала компактна кружна раскрсница представља адекватно решење за предметну локацију, јер се може реализовати у оквиру постојећег регулационог профила, уз ограничене грађевинске интервенције [4].



Слика 2. Постојеће стање – локација 1



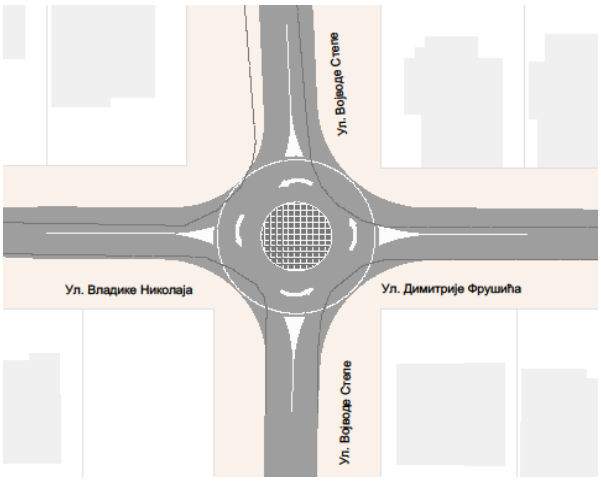
Слика 3. Будуће стање – предлог реконструкције у малу компактну кружну раскрсницу [4]

3.2. Пример локације четворокраке мини кружне раскрснице

Постојеће укрштање улица под правим углом са четири крака представља повољан просторни услов за пројектовање кружне раскрснице. На овој локацији могуће је испројектовати мини кружну раскрсницу пречника већег од минимално захтеваног, прилагођену ширини постојећег коловозног профила и просторним условима околног терена, што омогућава контролисано обликовање прилаза и централног острва. Тако се обезбеђује рационално коришћење простора и минималне грађевинске интервенције у околини, уз безбедно кретање возила прилагођено урбаним условима. Пројектовање већег пречника омогућава контролисано уклапање раскрснице у постојећу инфраструктуру, уз одржавање функционалности улице Војводе Степе. При пројектовању раскрснице узимају се у обзир ширине коловозних трака, радијуси закривљења прилаза, као и висинске коте коловоза и централног острва, како би се обезбедило контролисано успоравање возила и сигурно маневрисање [4].



Слика 4. Постојеће стање – локација 3



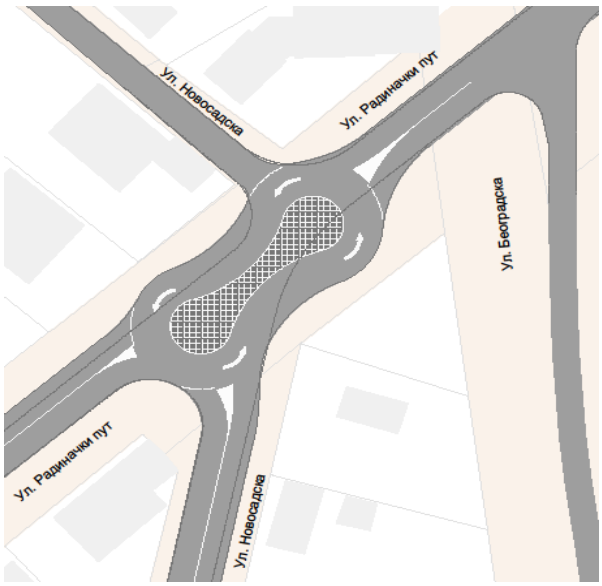
Слика 5. Будуће стање – предлог реконструкције у четворокраку мини кружну раскрсницу [4]

3.3. Пример локације двоструке мини кружне раскрснице

На правцу улице Радиначки пут забележене су веће брзине кретања возила, које често прелазе 50 km/h. Постојећи вертикални успоривачи делимично успоравају саобраћај, али раскрсница неправилне геометрије и даље представља разичну тачку. На овој локацији формирана је раскрсница неправилне геометрије, што је чини погодним примером за пројектовање двоструке мини кружне раскрснице. Двострука мини кружна раскрсница успоставља јасно дефинисан систем кретања возила, при чему се саобраћајни токови раздвајају и логично усмеравају кроз две повезане целине. Оваква организација постепено смањењује брзине и конфликтне тачке, што је посебно значајно код сложених и просторно неуједначених укрштања. Додатна предност решења огледа се у могућности фазне реализације и прилагођавања постојећим регулационим и просторним условима, без потребе за обимним захватима у околном простору. На тај начин, реконструкција представља технички рационално и дугорочно одрживо решење за унапређење безбедности и функционалности саобраћаја на улици Радиначки пут [4,5].



Слика 6. Постојеће стање – локација 6



Слика 7. Будуће стање – предлог реконструкције у двоструку мини кружну раскрсницу [4]

4. АНАЛИЗА И ПРИКАЗ ГЕОМЕТРИЈЕ РЕФЕРЕНТНЕ КРУЖНЕ РАСКРСНИЦЕ

4.1. Увод у анализу постојеће кружне раскрснице

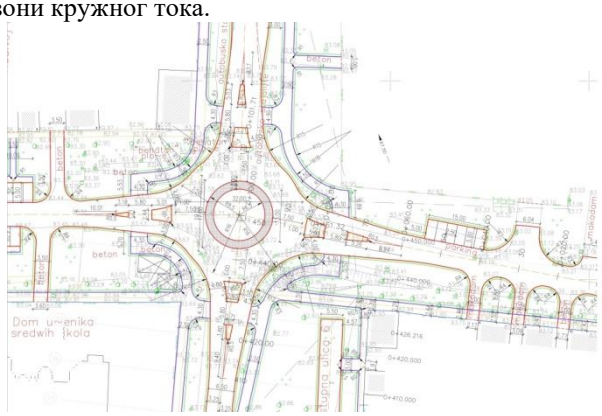
У овом делу рада анализирана је постојећа кружна раскрсница у Фрушкогорској улици у Сремској Митровици, која се издваја као успешно геометријско и урбанистичко решење у оквиру постојеће саобраћајне мреже. Кружна раскрсница у Фрушкогорској улици изграђена је истовремено са подвожњаком, чиме је обезбеђено повезивање северног и јужног дела града. Ова инвестиција створила је услове за даљи урбани развој и побољшала саобраћајну функционалност Сремске Митровице. У наредном тексту приказани су ситуациони план, нивелационо решење, као и подужни и попречни профили, што омогућава детаљну анализу просторно-геометријских односа и начина на који геометрија раскрснице утиче на кретање и успоравање саобраћаја. Циљ ове анализе је да се покаже како правилно дефинисана геометрија може обезбедити контролисано кретање возила, без ослањања на додатне мере физичког успоравања, и да послужи као модел за пројектовање нових раскрсница у урбаним условима [4, 6].



Слика 8. 3Д приказ кружне раскрснице

4.2. Ситуационо решење кружне раскрснице

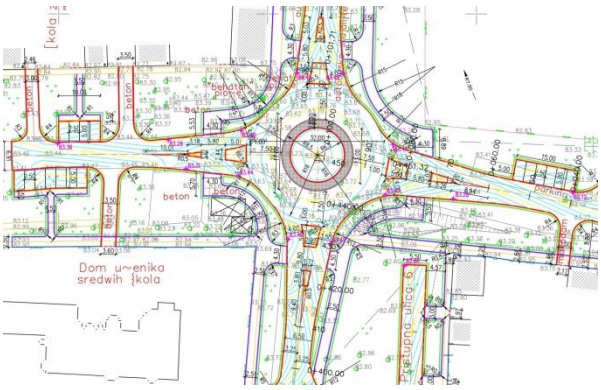
Приказано је ситуационо решење једнотрачне кружне раскрснице са централним острвом у Фрушкогорској улици у Сремској Митровици. Ситуациони приказ обухвата геометрију коловозних површина, положај и димензије централног и разделних острва, као и организацију пешачких површина и приступних пешачких стаза. Јасно су дефинисане трасе прилазних кракова са одговарајућим радијусима закривљења, чиме је обезбеђена адекватна дефлексија возила при уласку у кружни ток. Централно острво својом правилном геометријом омогућава јасно усмеравање саобраћајних токова и безбедно маневрисање возила у зони кружног тока.



Слика 9. Ситуационо решење постојеће кружне раскрснице

4.3. Нивелационо решење кружне раскрснице

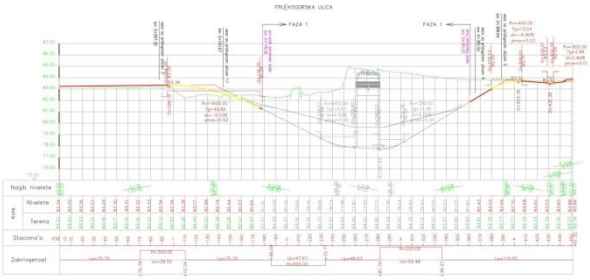
Нивелационо решење кружне раскрснице приказује висинску геометрију терена и планиране саобраћајнице. На слици су приказане коте постојећег терена, планиране коте коловоза и стационаже, што омогућава прецизан преглед висинских разлика унутар раскрснице. Ово решење представља основу за израду подужног профила и планирање радова, као и за контролу уклапања коловоза у постојећи терен. Приказ нивелације омогућава идентификацију критичних тачака и преглед нагиба, што је од кључног значаја за функционално и безбедно коришћење раскрснице.



Слика 10. Нивелационо решење постојеће кружне раскрснице

4.4. Подужни профил саобраћајнице

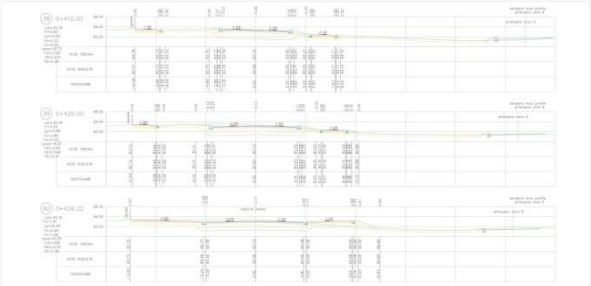
Подужни профил саобраћајнице представља вертикални пресек дуж трасе и омогућава преглед висинске геометрије коловоза у односу на терен. На приказаном подужном профилу Фрушкогорске улице приказани су нагиб нивелете, коте нивелете, коте постојећег терена, стационаже и закривљеност трасе (витоперење). Подужни профил служи као основа за контролу доследности пројектоване висинске геометрије са стварним теренским условима и за прецизно планирање извођења радова. Детаљан приказ елемената омогућава инжењерима да анализирају изводљивост пројекта, предвиде потенцијалне проблеме и процене потребу за додатним радовима на терену, чиме се обезбеђује да коловозна траса буде дуготрајна, безбедна и усклађена са техничким, функционалним и безбедносним стандардима.



Слика 11. Подужни профил

4.5. Попречни профил саобраћајнице

Попречни профил представља вертикални пресек коловоза у смеру нормалном на трасу и омогућава преглед ширине коловоза, косина и висинских односа на конкретним деоницама. На слици приказани су попречни пресеци у одабраним стационажама, што пружа прецизан увид у геометријске карактеристике коловоза. Попречни пресеци омогућавају анализу нагиба коловоза, проверу уклапања саобраћајнице у постојећи терен и оптимизацију висинске геометрије. Детаљан преглед попречних профила такође омогућава уочавање потенцијалних критичних тачака на коловозу, као што су нагли прелази или неуједначене косине и омогућава њихову корекцију у фазама пројектовања. На овај начин се обезбеђује да саобраћајница буде технички исправна, безбедна за кориснике и усклађена са постојећим условима терена.



Слика 12. Попречни профили

5. ЗАКЉУЧАК

Предмет овог мастер рада била је анализа примене раскрсница са кружним током саобраћаја у циљу управљања брзинама на саобраћајној мрежи града Сремска Митровица, са посебним освртом на грађевинске аспекте њиховог планирања и пројектовања. Кроз анализу различитих типова кружних раскрсница утврђено је да управо њихова геометрија представља кључни елемент управљања брзинама кретања возила. На основу спроведених анализа може се закључити да примена раскрсница са кружним током саобраћаја представља технички оправдано, просторно прилагодљиво и грађевински изводљиво решење за управљање брзинама на саобраћајној мрежи града Сремска Митровица. Уз адекватно пројектовање и усклађеност са важећим нормативима, кружне раскрснице имају значајан потенцијал да допринесу унапређењу функционалности, безбедности и дуготрајности градске саобраћајне инфраструктуре.

6. ЛИТЕРАТУРА

[1] Малетин Михаило, „Планирање и пројектовање саобраћајница у градовима“, *Орион арт*, Београд, 2009.

[2] ЈП Дирекција за изградњу Града Сремска Митровица, Просторни план територије Града Сремска Митровица, Сремска Митровица, 2015.

[3] ЈП Завод за урбанизам Војводине – Нови Сад, Генерални урбанистички план Града Сремска Митровица, Сремска Митровица, 2015.

[4] Студија управљања брзинама на уличној мрежи Града Сремска Митровица, Сремска Митровица, 2023.

[5] Правилник о условима које са спекта безбедности саобраћаја морају да испуњавају путни објекти и други елементи јавног пута, „Службени гласник РС“, бр. 50/2011, Београд.

[6] ЈП Путеви Србије, *Приручник за пројектовање путева у Републици Србији - 5.3 Кружне раскрснице*, Београд, 2012.

Кратка биографија:



Исидора Павловић рођена је 21.04.2000. године у Сремској Митровици. Дипломирала је на Факултету техничких наука 2024. године. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Грађевинарства – Примена раскрсница са кружним током саобраћаја у циљу управљања брзинама на саобраћајној мрежи града Сремска Митровица, одбранила је 2026. године..
Контакт:
isidorapavlovic36@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 624.01
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36CG03Despotovic

Процена стања и санација АБ конструкције вишеспратне пословне зграде у Новом Саду

Assessment and Repair of RC Structure of a Multi-Story Business Building in Novi Sad

Ђорђе Деспотовић, Слободан Шупић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ГРАЂЕВИНАРСТВО

Кратак садржај: *Рад се састоји из истраживачког и стручног дела. У првом делу истраживачког рада дат је осврт на АБ шипове, њихове врсте као и технике извођења. У другом делу истраживачког рада су детаљније описани ЦФА шипови. У стручном делу рада урађена је процена стања АБ конструкције пословне зграде у Новом Саду. Како би се утврдио степен оштећења и дао предлог санационих радова, спроведен је детаљан визуелни преглед свих доступних елемената конструкције. На основу анализе регистрованих дефеката и оштећења дат је предлог санационих мера у циљу обезбеђивања трајности конструкције.*

Кључне речи: *Процена стања, санација, АБ, пословни објекат.*

Abstract: *The study consists of a research part and a professional (practical) part. The first part of the research provides an overview of reinforced concrete (RC) piles, their types, and construction techniques. The second part of the research presents a more detailed description of continuous flight auger (CFA) piles. In the professional part, an assessment of the RC structure of a business building in Novi Sad was carried out. In order to determine the degree of damages and propose repair works, a detailed visual inspection of all accessible structural elements was conducted. Based on the analysis of the identified defects and damage, a set of repair measures was proposed with the aim of ensuring the durability of the structure.*

Keywords: *Assessment, repair, RC, business building.*

НАПОМЕНА: Овај рад је проистекао из мастер рада, чији је ментор др Слободан Шупић, ванредни професор.

1. УВОД

Дефекти и оштећења армиранобетонских (АБ) конструкција могу значајно да утичу на носивост, стабилност, употребљивост и трајност објекта. Њихов утицај се огледа у томе што могу довести до повећане пропустљивости бетона, директне изложености арматуре агресивној средини и иницирања процеса детериорације.

Трајност контрукције је у директној вези са квалитетом уграђених материјала али и са квалитетом изведених радова. Да би се смањила учесталост појаве дефеката на конструкцији, потребно је све радове на грађењу објекта изводити у складу са препорукама и стандардима. Тиме се постиже дужи експлоатациони период, смањују трошкови санације и подиже квалитет градње.

У раду је дата процена стања АБ конструкције вишеспратне пословне зграде у Новом Саду. Приликом детаљног виуелног прегледа објекта уочени су бројни дефекти и оштећења, која су захтевала више различитих мера санације. Предметни објекат се градио у току 2025. године.

2. ОСНОВНИ ПОДАЦИ О ОБЈЕКТУ

Предмет овог рада је пословни објекат у Новом Саду, спратноси Пр+4. Објекат у основи заузима неправилну, приближно троугаону форму уз обликовање радијалних фасадних контура. Дилатационим разделницама објекат је подељен на 8 конструктивно независних целина, односно ламела означених од Л1 до Л8. Стручни део овог рада се бави развојем дефеката и оштећења као и мерама санације на конструкцији у ламели Л1.

Ради утврђивања стварног стања носеће АБ конструкције ламеле Л1, предвиђено је да се обави детаљан преглед доступних елемената носеће АБ конструкције, што је предмет овог мастер рада.

Носећа конструкција објекта је изведена као монолитна армиранобетонска конструкција. Са аспекта

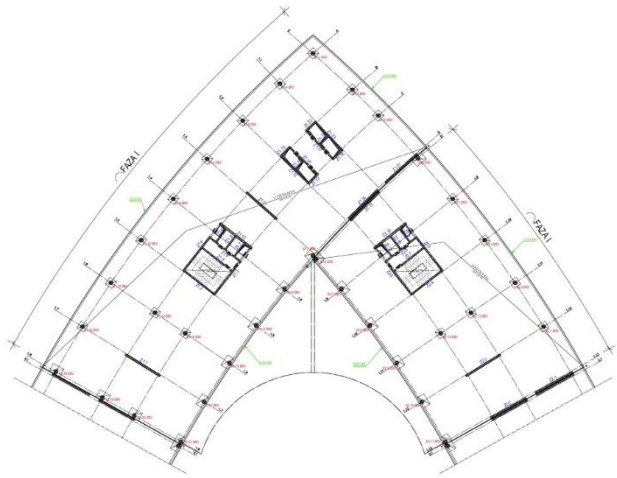
носећих вертикалних елемената, носећа конструкција је скелетна, укрућена са зидним платнима. Елементи носеће АБ конструкције ламеле Л1 су: стубови, греде, таваница типа пуне плоче и зидна платна. На основу анализе пројектно-техничке документације, утврђено је да су за носећу конструкцију ламеле Л1 одабране следеће врсте бетона:

- Бетон С35/45 за вертикалне АБ носеће елементе (стубови и зидна платна),
- Бетон С30/37 за хоризонталне АБ носеће елементе (међуспратне конструкције)

Општи изглед објекта је приказан на наредној Слици 1, а основа ламеле Л1 са ознакама оса на Слици 2.



Слика 1. Општи изглед објекта



Слика 2. Основа ламеле Л1 са ознакама оса

3. ДЕТАЉАН ВИЗУЕЛНИ ПРЕГЛЕД АБ КОНСТРУКЦИЈЕ

Резултати визуелног прегледа су систематизовани по елементима АБ конструкције и биће приказани у наставку за поједине елементе.

3.1. АБ зидна платна

Карактеристични дефекти АБ платана су:

- недовољна дебљина заштитног слоја (Слика 3)
- видљива арматура (Слике 3-6),
- бетонска гнезда (Слика 4),
- порозан бетон.

и следећа оштећења:

- мрежасте прслине,
- одвајање и отпадање заштитног слоја бетона (Слика 3),



Слика 3. Пуцање и отпадање заштитног слоја бетона



Слика 4. Бетонска гнезда на зидном платну



Слика 5. Одломљени део бетона



Слика 6. Отпадање заштитног слоја бетона

3.2. АБ стубови

Визуелним прегледом АБ стубова регистровани су следећи карактеристични дефекти:

- линијска сегрегација,
- бетонска гнезда.

и следећа карактеристична оштећења:

- одламање делова заштитног слоја бетона

На наредним сликама илустровани су карактеристични дефекти и оштећења



Слика 7. Изглед кружног монолитног стуба, порозан заштитни слој бетона



Слика 8. Мали заштитни слој бетона, пуцање и отпадање заштитног слоја бетона

3.3. АБ греде

АБ греде су изведене као монолитне, бетониране на лицу места, заједно са међуспратном конструкцијом. Греде су висине 80цм и ширине 20цм.

Карактеристичан дефект свих греда је мала дебљина заштитног слоја бетона (Слика 9), бетонска гнезда а регистрована су следећа оштећења:

- механичко оштећење – одламање заштитног слоја бетона



Слика 9. Бетонска гнезда на греди

3.4. АБ међуспратне таванице – пуне плоче

Визуелним прегледом су обухваћене доње и горње површине плоча. Карактеристична оштећења на плочама су прслине, праћене траговима процуривања – Слика 10.



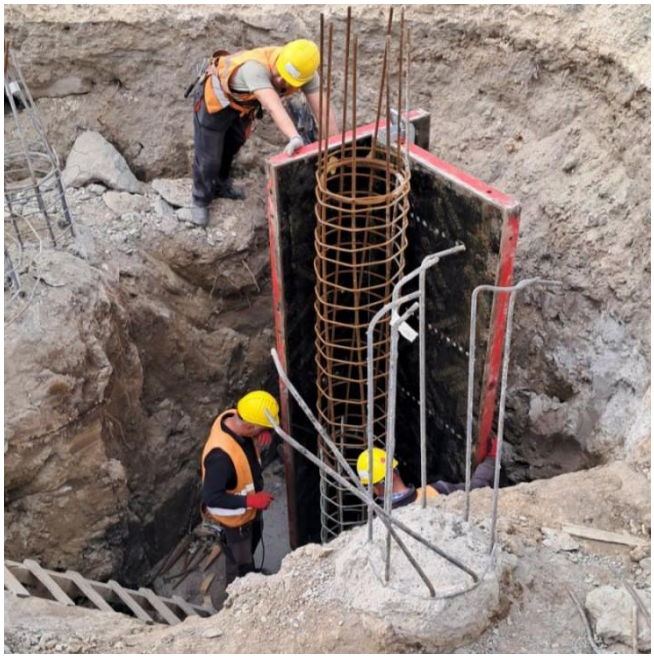
Слика 10. Трагови процуривања кроз оплату плоче

3.5. АБ шипови

Темељење објекта је изведено на бушеним шиповима пречника Ø600мм и дубине 15м. Карактеристичан дефект на шиповима је дисконтинуитет шипа, који се испитује тестирањем интегритера шипа.

За ову врсту дефекта, иазбрано је санационо решење у виду уклањања горњег дела шипа, изнад коте дисконтинуитета и његово поновно армирање и бетонирање до потребне висине.

Наставак бетонирања је вршен у оплати која је формирала квадратну основу 60х60цм.



Слика 11. Наставак бетонирања шипа

4. ЗАКЉУЧАК О СТАЊУ КОНСТРУКЦИЈЕ И ПРЕПОРУКЕ ЗА САНАЦИЈУ

Анализом добијених резултата након детаљне процене стања утврђено је:

- На АБ шиповима је уошена једна врста дефекта а то је дисконтинуитет шипа, који настаје као грешка током бетонирања шипа.
- На АБ стубовима и АБ зидним платнима су уочене четири врсте дефеката и једна врста оштећења. Дефекти који су уочени су рупичаста површина, сегрегација, површинска гнезда и бетонска гнезда, док је једино оштећење које се јавља, механичко оштећење у виду одваљених делова бетона. Најзаступљенији дефект од набројаних јесу бетонска гнезда као и рупичаста површина бетона, која је примећена код готово свих елемената. Површинска гнезда и бетонска гнезда су последица неадекватног збијања бетона при уградњи.
- На АБ степеништима су уочена два типа дефеката, то су бетонска гнезда и рупичаста површина. Рупичаста површина и бетонска гнезда се јављају на степеништима као последица неадекватног компактирања бетона.
- На АБ плочама и гредама су уочена три типа оштећења и дефеката. Први тип су прслине настале услед пластичног скупљања бетона, други тип су прслине настале услед седања бетона, док је трећи тип (по природи дефект) био бетонско гнездо.

Набројани детериорациони фактори редукују трајност конструкције, док су стабилност и носивост конструкције и даље очувани.

У циљу обезбеђења трајности елемената АБ конструкције, потребно је да се изведеу санациони радови, који се генерално могу сврстати у неконструкцијску санацију.

Неконструкцијска санација укључује следеће радове:

- Чишћење и заштита незаштићених шипки и репрофилација оштећеног бетонског пресека.
- Инјектирање прслина насталих услед скупљања бетона
- Засецање и запуњавање прслина насталих услед седања
- Репрофилација елемената на којима су регистрована механичка оштећења.

Предмером радова за санацију наведених дефеката и оштећења је срачунато да ће укупна цена коштања санације бити **1,019,040.00** динара (што износи око 8,700.00 евра).

6. ЛИТЕРАТУРА

[1] Проф. др Данијел Кукарас, Проф. др Слободан Шупић, предавања са предмета “Трајност и процења стања бетонских конструкција”, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2026.

[2] Проф. др Данијел Кукарас, Проф. др Иван Лукић, Проф. др Слободан Шупић, предавања са предмета “Санација бетонских конструкција”, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2026.

[3] СРПС ЕН 1504-10:2017: Производи и системи за заштиту и санацију бетонских конструкција – Дефиниције, захтеви, контрола квалитета и вредновање усаглашености – Део 10: Примена производа и система на терену и контрола квалитета радова.

Кратка биографија:



Ђорђе Деспотовић, рођен је 11.12.2000. године у Лозници. Основне академске студије грађевинарства на Департману за грађевинарство и геодезију Факултета техниких наука у Новом Саду завршио је 2024. године, а мастер рад из области Процене стања и санације бетонских конструкција брани 2026. године.
Контакт: despotovic.djordje00@gmail.com



Слободан Шупић рођен је 1989. године у Требињу у БиХ. Од 2013. године запослен је на Факултету техничких наука, а од 2025. ради као ванредни професор на Департману за грађевинарство и геодезију, ужа научна област: Грађевински материјали, процјена стања и санација конструкција.

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 624.012.4.059
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36CG04Rankovic

Процена стања АБ конструкције моста у Сремској Митровици уз примену БИМ алата

Condition Assessment Of The Reinforced Bridge Construction In Sremska Mitrovica Using BIM Tools

Дивна Ранковић, Иван Лукић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ГРАЂЕВИНАРСТВО

Кратак садржај – *Рад се састоји из теоријског и практичног дела. У теоријском делу рада приказане су основне карактеристике и значај BIM-а, као и приказ основа коришћења програмског пакета Autodesk Revit. У практичном делу рада извршена је процена стања армиранобетонске конструкције надпутњака у Сремској Митровици. У оквиру програмског пакета, формиран је тродимензионални модел (дигитални близанац) моста у ком су, применом елемената (фамилија), моделирана сви регистровани дефекти и оштећења, подељени према врсти, локацији и димензијама, што је омогућило да графичка документација и табеларни прегледа свих дефеката и оштећења (са свим унетим параметрима), потребни за доношење закључака о стању конструкције, буду генерисани аутоматски. Овакавим приступом је омогућено да се значајно олакша доношење одлука о врсти и количини потребних санационих радова, и што је посебно важно, формира модел за даље праћење стања анализиране конструкције.*

Кључне речи (три до пет): *процена стања, дефект, оштећење, BIM, Revit, дигитални близанац*

Abstract – *This thesis consists of a theoretical and a practical section. The theoretical section presents the fundamental characteristics and importance of Building Information Modeling (BIM), along with the basics of using Autodesk Revit. The practical section focuses on assessing the condition of a reinforced concrete bridge in Sremska Mitrovica. A three-dimensional model (digital twin) of the bridge was developed, where all identified defects and damages were modeled using parametric elements (families) and classified by type, location, and dimensions. This enabled automatic generation of graphical documentation (plans, sections, and details) and tabular reports containing all relevant parameters. This approach facilitates more efficient decision-making regarding the type and scope of required rehabilitation works, while also providing a model suitable for continuous monitoring of the structure's condition.*

Keywords: (three to five): *condition assessment, defect, demage, BIM, Revit, digital twin*

НАПОМЕНА: Овај рад је проистекао из мастер рада чији је ментор био др Иван Лукић, ред.проф.

1. УВОД

Задатак овог рада је идентификација, класификација и анализа оштећења и дефеката на предметном надпутњаку уз примену BIM алата. За формирање дигиталног модела и његову интеграцију у BIM окружење, одабран је програмски пакет *Autodesk Revit* због могућности формирања специјалних парамтеризованих елемената (фамилија) којима ће бити моделирани регистровани дефекти и оштећења.

2. ШТА ЈЕ BIM - Building Information Modeling?

BIM представља иновативан приступ пројектовању, изградњи и управљању инфраструктуром и објектима, који доноси низ предности и значајно унапређује процесе у грађевинској индустрији. Поред тога, подржава унапређену сарадњу између чланова тима, омогућавајући приступ и ажурирање података у реалном времену, чиме се смањује потреба за комуникацијом путем папира и повећава укупна ефикасност. Тродимензионални модели у оквиру BIM-а омогућавају управљање животним циклусом објекта, од фазе пројектовања, преко изградње, па све до одржавања, као и евентуалне надоградње, реконструкције или санације. У зависности од могућности BIM алата, информације прикупљене током визуелног прегледа могу се на различите начине повезати са елементима конструкције, при чему је циљ интеграције постизање што веће прецизности како би се на ефикасан начин могли идентификовати проблеми и дефинисати даљи кораци. Информације које се интегришу обухватају физички опис и статус елемената конструкције, врсту и величину дефеката, односно оштећења, фотографије, податке о испитивањима, као и оцену стања елемената [1].

3. ОСНОВНИ ПОДАЦИ О КОНСТРУКЦИЈИ

Надпутњак на деоници: петља Сремска Митровица - петља Рума, изграђен је 1981. година. Укупна дужина, укључујући и прелазне плоче, износи 65m, а главну распонску конструкцију чине две просте греде једнаких распона од по 29.15m. Растојање мерено од осе лежишта над обалним стубом до осе средњег стуба је 29.33m. Конструкција надпутњака је у правцу.

Попречни пресек главног носача чине пет сандучастих претходно напрегнутих носача, постављених један уз други. Сандучасти носач је константне ширине 2.1m и висине 1.14m целом дужином - доња плоча је дебљине 10cm, а горња плоча и ребра су дебљине 10cm. Према подацима са цртежа типског попречног пресека пројектанта "Viadukt", марка бетона је min. МБ40, а коришћена је ужад за адхезионо преднапрезање 6Ø5 система ИМС. Сваки главни носач је ослоњен на по два лежишта испод ребара сандука на осовинском растојању од 29.15m у подужном правцу. На свим стубовима су примењена армирана еластомерна лежишта типа НАЛ, правоугаоног пресека димензија 20/25 cm и висине 41mm.



Слика 1. Изглед надпутњака

Крајњи стубови-опорци изведени су као масивне АБ конструкције изведене на лицу места, док је средњи стуб у оси С2 изведен као рамовска коснтрукција у правцу управном на главне носаче, састављена од два префабрикована стуба укупне дужине 10.6m на осовинском размаку од 7.15m повезана лежишном риглом. Лежишна ригла је трапезног пресека висине 100cm и ширине од 80cm у врху испод лежишта, до 60cm на споју са стубовима. Димензије крајњих стубова, сем дела који је видљив изнат терена, нису познате.

Начин фундирања конструкције није познат. Због података доступних за више сличних мостовских конструкција у околини, претпостављено је да је фундирање на шиповима.

3.1. Саобраћајни профил

Саобраћајни профил укупне ширине од 11.3m чине коловоз ширине 7.2m и обостране ревизионе стазе са пешачком и заштитном челичном оградом бруто ширине по 2.05m. Ревизионе стазе су у односу на коловоз издигнуте за 14 cm. Примењени су префабриковани бетонски ивичњаци димензија 18/20 cm. Површине за пешачки саобраћај између ограде ревизионе стазе и челичне заштитне ограде су 1.09m. Коловоз на надпутњаку је у правцу, у вертикалној кривини са највишом тачком у оси средњег стуба и подужним падом од око 3% ка крајњим стубовима С1 и С3. На самом надпутњаку не постоје сливници за одводњавање коловоза и ревизионих стаза - за одводњавање су предвиђене риголе на нижој страни попречног пресека смештене на крају крилних зидова стубова С1 и С3. На коловозу је изведен застор од асфалта дебљине 8cm, преко хидроизолације на бази битуменских трака. Застор на ревизионим стазама је од асфалта дебљине 2cm.

4. ВИЗУЕЛНИ ПРЕГЛЕД

Визуелни преглед обухватио је више излазака на локацију, током којих је извршено детаљно визуелно сагледавање конструкције, идентификација свих доступних конструктивних елемената, као и њихово прецизно премеравање. Посебан акценат стављен је на прикупљање геометријских података носећег система, укључујући распоне, пресеке, положај и димензије главних и секундарних елемената, али и на евидентирање уочених дефеката и оштећења. Визуелним прегледом регистровани су следећи дефекти и оштећења на АБ конструкцији моста:

Дефекти:

- Мала дебљина (недовољна) заштитног слоја
- Бетонско гнездо
- Рупичаста површина
- Локална запрљаност у околини лежишта - песак и ризла
- Присуство влаге у зони лежишта

Оштећења:

- Пуцање и отпадање заштитног слоја бетона
- Видљива оголела арматура и кородирала арматура(активна корозија)
- Прслине/пукотине услед савијања
- Мрежасте прслине
- Прслине/пукотине у зони котве
- Оштећење: пукотина у асфалту
- Оштећење: поправке/асфалтне закрпе
- Влажне зоне
- Неконструкцијско: оштећење ивичњака
- Неконструкцијско: оштећење парапетних плоча
- Механичко оштећење

На наредним сликама приказана су нека од регистрованих оштећења.



Слика 2. - Пуцање и отпадање заштитног слоја бетона



Слика 3. -„Д“ пукотине у асфалту у зони дилатација



Слика 4. - Пуцање и отпадање заштитног слоја бетона



Слика 5. - Мрежасте прслине

5. ФОРМИРАЊЕ БИМ МОДЕЛА - ДИГИТАЛНОГ БЛИЗАНЦА

На основу прикупљених података о геометријским и материјалним карактеристикама носећег система, регистрованих дефеката и оштећења приступљено је изради дигиталног модела конструкције (тзв.дигитални близанац) применом BIM алата, при чему је модел конципиран тако да што верније репрезентује реално геометријско и функционално стање надвожњака.

У циљу прецизнијег приказа уочених оштећења и боље систематизације података, у оквиру BIM модела коришћене су прилагођене фамилије у програмском пакету Revit. Ове фамилије су постављане директно на површине конструктивних елемената, односно на конкретне позиције на којима су током теренског прегледа уочени дефекти и оштећења. На тај начин омогућено је њихово тачно просторно позиционирање у оквиру модела.

Сваки појединачни дефект је додатно обележен, именован и описан, при чему су у оквиру параметара фамилија унети релевантни подаци као што су тип оштећења, степен оштећења, као и пратећа фото-документација са терена.



Слика 6. - Дигитални близанац



Слика 7. - Фамилије и њихов изглед на BIM моделу

6. АНАЛИЗА ПОДАТАКА ПРИКУПЉЕНИХ ВИЗУЕЛНИМ ПРЕГЛЕДОМ

Процена стања предметног надпутњака извршена је на основу детаљног визуелног прегледа доступних елемената конструкције, уз израду фото-документације и анализу уочених појава. Током прегледа није вршено испитивање носивости нити деструктивна испитивања материјала. У раду је дата анализа стања по елементима АБ конструкције надвожњака.

6.1. Анализа стања АБ стубова

Резултати визуелног прегледа односе се на делове крајњих АБ стубова и стубове средишњег АБ рама, који су били доступни за преглед. Карактеристична оштећења АБ стубова су: пуцање и отпадање заштитног слоја бетона, видљива оголела арматура и кородирала арматура, прслине/пукотине услед савијања, мрежасте прслине, влажне зоне.

6.2. Анализа стања лежишта

Резултати визуелног прегледа односе се на делове лежишта и њихову околину, који су били доступни за преглед. Површина лежишта је локално запрљана и изложена влази. Видљиве наслаге ситног материјала (песак, зрна, дробљени камен) око и испод лежишта. Опште стање лежишта може се оценити као задовољавајуће.

6.3. Анализа стања главних носача

Резултати визуелног прегледа односе се на делове преданпрегнутих главних сандучастих носача који су били доступни за преглед. Унутрашњи делови сандука нису били доступни за визуелни преглед, због чега се анализа односи на спољашње делове главних носача. Дефекти уочени прегледом су: мала дебљина заштитног слоја и рупичаста површина. А од оштећења постоје: пуцање и отпадање заштитног слоја бетона, прслине/пукотине дуж кородирале арматуре, прслине/пукотине у зони котве, мрежасте прслине, видљива оголела арматура и кородирала арматура, влажне зоне, механичко оштећење.

6.4. Анализа стања коловозне плоче

Коловозна плоча надвожњака је у функцији и омогућава несметано одвијање саобраћаја. Површина коловоза показује уобичајене знаке хабања услед експлоатације. Визуелним прегледом нису уочени дефекти на конструкцији надвожњака, док су регистрована оштећења: пукотина у асфалту и поправке/асфалтне закрпе.

6.5. Анализа стања пешачке стазе

Пешачка стаза је визуелно прегледана у доступним деловима. Регистрована оштећења: пукотина у асфалту и пуцање и отпадање заштитног слоја. Поред ових су регистрована и неконструкцијска оштећења: оштећење ивичњака и оштећење парапетних плоча. Заштитна ограда уз стазу делује функционално, без уочених већих деформација.

6.6. Закључак о стању конструкције

На основу анализе резултата добијених визуелним прегледом крајњих АБ стубова (С1 и С3) и средишњег АБ рама (С2), закључено је да носивост није значајно смањена. Трајност конструкције је локално угрожена, посебно на стубу С1 који представља најкритичнији елемент.

Лежишта су у задовољавајућем стању и у пројектованом положају, без уочених значајнијих оштећења која би утицала на носивост, трајност и функцију конструкције.

На основу анализе резултата главних носача (S1, S2, S3, S4, S5), закључено је да носивост није смањена. Трајност конструкције је угрожена, а естетски изглед нарушен, при чему се као најоштећенији елемент издваја сандучасти носач S3.

На основу анализе резултата коловозне плоче, закључено је да носивост није смањена и да је коловозна плоча у функцији. Трајност завршног слоја је делимично угрожена, а естетски изглед нарушен.

На основу анализе резултата пешачке стазе, закључено је да носивост није смањена и да је пешачка стаза функционална за коришћење. Трајност је делимично угрожена, а естетски изглед нарушен.

Prsline i pukotine u zoni kotve						
Element konstrukcije	Pozicija	Duzina (cm)	Dubina (cm)	Sirina (cm)	Povrsina (m2)	Dodatni komentar
Prsline/pukotine u zoni kotve kablova za prednaprezanje						
Sanduk S1/C1-C2	ПК 1	15	2	15	0.60 m²	promena boje sanduka
Sanduk S1/C1-C2	ПК 3	20	1	20	0.60 m²	vidljive prsline u zoni kotve
Sanduk S1/C1-C2	ПК 2	20	1	20	0.60 m²	vidljive prsline u zoni kotve
Sanduk S1/C2-C3	ПК 4	20	1	20	0.60 m²	vidljive prsline u zoni kotve
Sanduk S1/C2-C3	ПК 5	20	1	20	0.60 m²	vidljive prsline u zoni kotve
Sanduk S1/C2-C3	ПК 6	15	1	15	0.60 m²	nepravilan nastavak betoniranja
Ukupno:					3.59 m²	

Табела 1. - Преглед оштећења из Revita: прслине и пукотине у зони котве

7. ПРЕДЛОГ САНАЦИОНИХ МЕРА

7.1. Санација АБ стубова

Санација армиранобетонских стубова има за циљ заустављање процеса корозије арматуре, обнову заштитног слоја бетона, затварање постојећих пукотина и укупно повећање трајности конструкције. С обзиром на уочена оштећења, посебна пажња посвећује се зонама испод дилатација, зонама ослањања конструкције, као и најкритичнијем стубу С1. У оквиру припремних радова неопходно је уклонити растиње и наслаге земље, а након тога следи уклањање локалних оштећења пажљивим штемањем пикхамером, уз обавезно формирање зона за санацију правилног облика.

7.2. Санација еластомерних лежишта

Поред тога што су лежишта током визуелног прегледа оцењена као функционална и у задовољавајућем стању, у циљу обезбеђења дугорочне поузданости конструкције неопходно је спровести одређене превентивне мере, као што је детаљно чишћење лежишта и њихове непосредне околине, уклањањем наслага прашине, песка и другог ситног материјала који може утицати на њихов рад. Након тога, потребно је проверити функционалност лежишта.

7.3. Санација преднапрегнутих главних носача

Основни циљеви санације су заштита преднапрегнуте арматуре, спречавање даље корозије и обезбеђење дуготрајности конструкције.

Радови обухватају уклањање деградираног бетона и репрофилацију оштећених зона применом малтера високих перформанси, уз претходно чишћење и антикорозивну заштиту арматуре. Пукотине се санирају у складу са њиховим карактером, тако да се конструктивне пукотине инјектирају, док се мрежасте прслине третирају површинским заштитним премазима. Посебна пажња посвећује се зонама котви, где је неопходно извршити детаљну инспекцију.

7.4. Санација коловозне конструкције

Санација коловозне плоче има за циљ обезбеђење водонепропусности, спречавање продора агресивних утицаја у конструкцију и повећање трајности система.

7.5. Санација пешачке стазе

Санација пешачке стазе усмерена је на побољшање функционалности и безбедности корисника , а радови обухватају уклањање постојећих оштећених слојева и израду новог завршног слоја стазе, уз претходну припрему подлоге. Оштећени ивичњаци и парапетне плоче се замењују новим елементима и адекватно фиксирају.

7.6. Опште препоруке

У циљу прецизнијег дефинисања обима и начина санације конструкције, неопходно је спровести додатна детаљна испитивања материјала и стања конструктивних елемената. Посебну пажњу потребно је посветити прегледу делова конструкције који нису били доступни током визуелног прегледа, а пре свега унутрашњости сандучастих носача, где може доћи до задржавања влаге и развоја корозије.

8. ЗАКЉУЧАК

Примена BIM (Building Information Modeling) концепта у овом раду омогућила је интеграцију података о конструкцији, оштећењима и предложеним санационим мерама у јединствен дигитални модел. На тај начин створена је основа за ефикаснije планирање санационих радова, бољу комуникацију између учесника у пројекту и могућност даљег праћења стања конструкције током експлоатације

9. ЛИТЕРАТУРА

[1] И. Лукић, “Департман за Грађевинарство и у,” 2024. [Online]. Available: ew.gradjevinans.net/course/bim-u-gradevinarstvu/. :d 03 2024].

[2] О. Рачунарски инжењеринг, “Autodesk Revit 17. [Online]. Available: utodesk.osa.rs/revit/. [Accessed 2026].

Кратка биографија:



Дивна Ранковић рођена је у Сремској Митровици 2000. год. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Грађевинарство - Конструкције одбранила је 2026.год.
Контакт:
rankovicdivna.gr81.2019@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 624.05
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36CG05Barjaktarovic

Индустријализација у канализационим системима

Industralization in the Sewage Systems

Бојан Барјактаровић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм - ГРАЂЕВИНАРСТВО

Кратак садржај – *Рад се бави применом индустријализације у канализационим системима са посебном пажњом ка префабрикованим елементима, насупрот традиционалном начину извођења радова. Извршена је анализа свих кључних елемената система, као и технологија и организација њиховог извођења, приказана на конкретном примеру из праксе.*

Кључне речи: *индустријализација грађења, префабрикација, канализациони системи*

Abstract – *The paper examines the application of industrialization in the sewage systems, with particular emphasis on the prefabricated elements, as opposed to traditional constructions methods. A comprehensive analysis of the key system components, as well the tehnologies and organizational aspects of their implementation, is presented through a representative case study.*

Keywords: *Industrialization of construction, Prefabrication, Sewage systems*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Тривунић Милан, ред. проф.

1. УВОД

Индустријализација [1] је економски феномен заснован на великој или интензивној производњи робе. У исто време, то је био историјски, економски и социјални подстицај за секторе и земље. Индустријализација у грађевинској грани привреде, највише се огледа у префабрикованим елементима различитих система, а у овом случају, канализационих. Префабрикациони елементи представљају све оне ставке система које ће бити израђене у фабрици, и бити транспортоване на градилиште, за њихову монтажу. Сваки од ових засебних елемената, мора поседовати пратећу атестну документацију, која представља званични документ којим се доказује да су производи, опрема или материјал претходно испитани и усклађени са важећим стандардима и техничким описима.

Конкретни примери елемената, као и њихова примена, који ће у наставку рада бити разматрани су:

1. Армирано-бетонски елементи:
   - Црпне станице
   - Шахт елементи
   - Затварачнице
2. Пластичне цеви
   - ПВЦ (Поливинилхлорид)
   - ПЕХД (Полиетилен велике густине)
3. Ливено – гвоздени елементи:
   - Шахт поклопци
   - Шахт „пењалице“
4. Дуктилно ливени фазонски комади
5. Челична подграда – талпе

2. АРМИРАНО БЕТОНСКИ ЕЛЕМЕНТИ

2.1 Црпне станице

Црпне станице су АБ шахтови великих димензија, који служе за препумпавање садржаја цевовода уз помоћ хидромашинске опреме која се налази у њиховој унутрашњости, ради савладавања терена. У највећем броју случајева чине најзахтевније елементе канализационих система за извођење, због својих неретко великих димензија. Из овог проблема, произишла је потреба њихове префабрикације. Због својих димензија, цела црпна станица не може бити изведена као један елемент (слика 1), како због транспорта, тако и због монтаже оплате и арматуре.



Слика 1. Монтажа елемената црпне станице

2.2 Шахт елементи

Шахт елементи представљају АБ елементе који су део система ревизионих окна која служе за одржавање система након његовог извођења, односно за време животног века датог објекта. Постоји неколико типова основних елемената:

- Конусни елемент 600/1000 mm
- Кружни АБ елемент 1000/1000 mm
- Кружни АБ елемент 1000/500 mm
- Кружни АБ елемент 1000/250 mm
- Проточна "када" – базни елемент

Ови елементи се армирају и бетонирају у фабрици, складиште на једном месту, а затим тако транспортују на градилиште ради њихове даље уградње у систем (слика 2 и слика 3).



Слика 2. Шахт елементи ДН1000/1000 спремни за транспорт


Слика 3. Конусни шахт елементи ДН600/1000 спремни за транспорт

2.3 Затварачнице

Затварачнице, односно мулјни испусти и ваздушни вентили, представљају незаобилазни део канализационих система под притиском. То су АБ елементи у чијој унутрашњости се налазе фазонски комади од дуктилног лива. Као и црпне станице и шахт елементи, армирају се и бетонирају у фабрици, складиште и затим тако транспортују на градилиште ради даље монтаже (слика 4).


Слика 4. АБ затварачнице спремне за транспорт

3. ПЛАСТИЧНЕ ЦЕВИ

Постоје два најчешћа подтипа канализационих система:

- Гравитациони системи
- Системи под притиском

За потребе гравитационих система користе се ПВЦ цеви, док се за системе под притиском користе ПЕХД цеви. У пракси, канализациони системи најчешће представљају комбинацију оба подтипа цевовода.
ПВЦ цеви статистички имају највећи удео, а разлог је цена њихове израде, монтаже и рада, која је неколико пута мања у односу на ПЕХД цеви, што произилази из чињенице да се у оваквим системима садржај цевовода креће силама гравитације, без потребе за пумпама. Постоји широк асортиман ових цеви. Разликују се њихове дужине, пречници и чврстоће, а производе се и тзв. фитинзи који служе за скретање, сужење, проширење, затварање или санацију цевовода, а то су:

- Лукови
- Косе и праве рачве
- Редукције
- Клизне спојке
- Чепови

Ове цеви се производе у фабрици, складиште а затим транспортују на градилиште ради даље монтаже (слика 5).


Слика 5. ПВЦ цеви ДН250 спремне за транспорт [2]

ПЕХД цеви отпорне су на високе притиске, па се користе у системима под притиском. Представљају директну спону са хидромашинском опремом и цевоводом у црпним станицама. ПЕХД цеви се такође

производе у фабрици, складиште и транспортују на градилиште, где ће се уградити у систем (слика 3).



Слика 6. ПЕХД цеви, спремне за транспорт [3]

4. ЛИВЕНО – ГВОЗДЕНИ ЕЛЕМЕНТИ

У ову групу префабрикованих елемената спадају шахт поклопци (слика 7) и „пењалице“. Оба елемента представљају незаобилазан део гравитационих система, у оквиру АБ шахтова. Свако ревизионо окно мора да има поклопац, ради безбедности и смањења непријатних мириса, као и пењалице које служе за силажење до цевовода. Стандардни шахт поклопци могу бити кружног или квадратног облика.
Деле се према оптерећењу, и могу бити:

- Б125 (за пешачко оптерећење)
- Ц250 (за саобраћајно оптерећење)
- Б400 (за тешко саобраћајно оптерећење)
- Е600 (за аеродроме)



Слика 7. Кружни шахт поклопац Д400 [4]

5. ДУКТИЛНО ЛИВЕНИ ФАЗОНСКИ ЕЛЕМЕНТИ

Тзв. „фазонерија“, највећу примену пронашла је у водоводним системима, међутим саставни су део и канализационих система под притиском. Било која промена правца, муљни испуст или ваздушни вентил, захтевају уградњу ових елемената. Постоји велики асортиман дуктилно ливених фазонских комада, а неки од њих су:

- Q комади (лукови)
- H комади (лукови са стопом) (слика 8)
- ФФ комади
- T комади
- ФФР комади
- Ваздушни вентили



Слика 8. Пример дуктилно ливеног фазонског комада – H комад [5]

6. ЧЕЛИЧНА ПОДГРАДА – ТАЛПЕ

Подграда радних јама (слика 9) такође се сматра индустријализацијом, и представља велики помак у безбедности радника на градилишту. Разликују се следеће димензије челичних талпи:

- 3.5 × 1.5 × 0.12 метара
- 4.5 × 1.5 × 0.12 метара
- 6.0 × 1.5 × 0.12 метара



Слика 9. Израда цевовода ДН1800 са челичном подградом

7. ПРИМЕР ИЗ ПРАКСЕ

У току извођења радова на изградњи канализационог система отпадних вода насеља Гудурица и Велико Средиште [6], коришћени су сви претходно наведени елементи. Намена овог система јесте да прикупи отпадне воде ова два насеља и одведе их до постојеће канализације града Вршца. Систем се састоји од укупно 20671 метра гравитационе мреже (ПВЦ ДН250), 5510 метара система под притиском (ПЕХД ДН110; ДН160 и ДН200), 1279 кућних прикључака. Поред цевовода, мрежа се састоји и од 6 црпних станица и 17 затварачница.
Извођач радова на овом пројекту је ГП „Градитељ НС“.
Сви елементи који су претходно описани у овом раду, произведене се или у фабрикама, или у главној бази предузећа ГП „Градитељ НС“ и затим се транспортују на градилишну базу у насељу Велико Средиште.

Анализом цене једног типског АБ ревизионог окна, израчунат је податак да је цена префабрикованог АБ ревизионог окна 47,138.51 РСД и да је потребно 13 часова за њену монтажу, док је за израду истог тог ревизионог окна на лицу места потребно 76,332.00 РСД и 33 часа.

8. ЗАКЉУЧАК

Индустријализација представља значајан корак ка унапређењу ефикасности, поузданости и одрживости урбане инфраструктуре. Примена индустријкси произведених елемената, стандардизација компоненти и употреба савремених материјала омогућавају бржу изградњу, смањење трошкова одржавања и повећање трајности ситема. Поред техничких предности, индустријализација доприноси бољој контроли квалитета, већој безбедности извођења радова и смањењу негативног утицаја на животну средину. У савременим условима урбанизације и раста становништва, системски и индустријализован приступ пројектовању и изградњи канализационих система представља неопходан предуслов за одрживи развој и дугорочну функционалност комуналне инфраструктуре. На основу спроведе анализе цена, може се констатовати да постоје значајне разлике између примене префабрикованих система, и извођења радова на самом градилишту. Анализа цена показала је да је израда префабрикованих елемената повољнија са економског аспекта. Наведена економска разлика последица је повећаних трошкова радне снаге, оплате и ангажовања радне снаге. Поред финансијског аспекта, значајна разлика може се уочити и у времену потребном за реализацију једног елемента. Ово указује на знатно већу ефикасност префабрикованог решења, а главна уштеда огледа се у уклањању чекања очвршћавања бетона. Са становишта организације, примена префабрикованих система апсолутно је оправдана, овакво решење је нешто чему треба да се тежи и у будућности, јер омогућава истовремено смањење трошкова и времена извођења, уз повећање ефикасности, контроле квалитета и укупне поузданости грађевинског процеса.

9. ЛИТЕРАТУРА

[1] М. Тривунић, Ј. Дражић, “Монтажа бетонских конструкција зграда“, АГМ књига, 2009.

[2] https://www.st-cs.si/pvc-za-ulicno-kanalizacijo/

[3] https://pestan.net/?lang=sr

[4] hedone.hr

[5] vatropromet.hr

[6] ПЗИ Гудурица и Велико Средиште – Свеска 3, хидротехничке инсталације, „Војводинапројект“

Кратка биографија:



Барјактаровић Бојан рођен је у Новом Саду 2001. године. Дипломски рад из области грађевинарство, на тему „Пројекат технологије и организације грађења резервоара питке воде „Штранд“ у Новом Саду“, одбранио је 2024. године на Факултету Техничких наука у Новом Саду. Мастер студије истог факултета на студијском програму Грађевианрство, модул Организација грађења, уписао је 2024. године. Тренутно је запослен у ГП „Градитељ НС“.

Контакт: barjaktarovic.grns@gmail.com

Proceedings of the Faculty of Technical Sciences, Novi Sad

UDK: 624:004.8
DOI: https://doi.org/10.24867/36CG06Buhvis

Студије случаја BIM-а унапређеног вештачком интелигенцијом за ефикасност управљања пројектима у великим грађевинским пројектима

Case Studies of AI-Augmented BIM for Project Management Efficiency in Large-Scale Construction

Ahmed Ataya Basheer Bouhuweesh, ***Faculty of Technical Sciences, Novi Sad***

STUDY PROGRAMME – CIVIL ENGINEERING

Кратак садржај – *Овај рад истражује интеграцију вештачке интелигенције (AI) са моделирањем информација (BIM) ради побољшања ефикасности управљања пројектима у великим грађевинским пројектима. Користећи методологију студије случаја, анализирана су три иновативна мегапројекта: Crossrail (УК) који користи предиктивну аналитику за управљање распоредом; Google Bay View (САД) који користи генеративни дизајн за оптимизацију MEP система; и Melbourne Metro (Аустралија) који користи компјутерски вид за праћење напретка и безбедности. Резултати показују документована побољшања ефикасности: 70% брже идентификовање ризика (Crossrail), 10-15% смањење трошкова MEP система (Google), и 80-90% брже извештавање о напретку (Melbourne Metro). Анализа случајева открива три кључна фактора успеха: зрелост BIM-а као предуслов, јасну дефиницију проблема пре избора AI, и улагање у квалитет података и управљање променама.*

Кључне речи: *BIM, вештачка интелигенција, ефикасност управљања пројектима, студија случаја, грађевинарство*

Abstract – *This study examines the influence of Artificial Intelligence (AI) in conjunction with BIM to improve the efficiency of project management in the field of construction projects. There are many issues within the construction industry globally, such as high cost overruns that amount to 80%, and time overruns averaging 20% for megaprojects over $500 million. Although BIM is a very strong tool for collaboration and data management, its capabilities for predicting problems are very limited. In contrast, AI technologies can provide pattern recognition, predictions, and automation, all of which are useful additions to the capabilities provided by BIM. A multiple case study method is applied: Crossrail/Elizabeth Line (UK) using predictive analytics for schedule risk; Google Bay View Campus (USA) using generative design for MEP optimization; and Melbourne Metro Tunnel (Australia) using computer vision for progress and safety monitoring. Findings show documented efficiency gains: 70% faster risk identification (Crossrail), 10-15% MEP cost reduction (Google), and 80-90% faster progress reporting (Melbourne Metro). Cross-case analysis reveals three critical success factors: BIM maturity as a prerequisite, clear problem definition before AI selection, and investment in data quality and change management. The paper concludes with a phased implementation framework for practitioners and recommendations for future research.*

Keywords: *BIM, Artificial Intelligence, Project Management Efficiency, Case Study, Construction.*

NOTE: This paper is derived from the master's thesis supervised by Dr Igor Peško, Full Professor.

1. INTRODUCTION

The largest industry in today's world is the construction industry. It constitutes 13% of the GDP of the world. Nevertheless, even with the immense contribution that the industry makes to the economy, it has continued to face challenges regarding performance and productivity. As noted by Flyvbjerg [1], on average, megaprojects (> $500 million) experience cost overruns of 80% and schedule delays of 20%. This data shows both a financial loss and lost opportunities for the development of infrastructure and the economy. Large megaprojects are particularly sensitive to inefficiencies because of their tremendous complexity, number of participants, and duration. A megaproject is always a project with hundreds of contractors, thousands of employees, and a duration ranging from years to decades. Poor project performance results from various reasons: fragmented supply chains with siloed information, reactive decision making when an issue is dealt with only after appearing, information asymmetry when participants do not have consistent information at hand, and outdated paper-based processes.

In order to solve these recurring issues, the construction industry has increasingly relied on Building Information Modelling (BIM) technology. BIM does not only deal with visualization but involves the creation of intelligent models containing extensive data sets that all team members can utilize. The BIM model consists of both geometrical data and semantic data regarding the materials used, quantities, cost estimation, planning, and performance. BIM maturity can be gauged using the Bew-Richards Maturity Model, which identifies four levels: Level 0 (unmanaged CAD), Level 1 (managed CAD in 2D/3D format), Level 2 (collaborative working with federation of models), and Level 3 (collaboration using open data). In megaprojects,

BIM Level 2 or above has become a contract requirement in several countries such as the UK, Singapore, Finland, and the UAE.

Yet, while BIM is quite effective in terms of information structuring, visualization, and coordination, its native advanced analysis, prediction, and automated decision-support abilities fall short. BIM is primarily a descriptive technology. It informs project managers about what was planned and, if updated, what was done. Yet BIM cannot accurately predict future events and suggest corresponding decisions. This shortcoming makes it possible for artificial intelligence technologies to enhance BIM's performance. Artificial Intelligence (AI) has already proved itself to be an unprecedented disruptive technology in such spheres as manufacturing, medicine, and finance. When applied to the construction sphere, ML, CV, and NLP make it possible to deal with massive amounts of data and extract valuable insights from them. The convergence of BIM's data-driven nature with AI's powerful analytics makes a combination that is known as AI-augmented BIM.

Although there is theoretical feasibility of AI-enabled BIM integration, there still remains a wide chasm between the possibilities provided by such integration and its practical implementation. Adoption of AI technology in the construction sector is relatively new and largely experimental. Although many models and research works provide ideas for using AI technology in construction management, there is a lack of scientific analysis dedicated to the successful implementation of AI technologies in mature BIM projects. This research attempts to fill that void by exploring the relationship between BIM and AI for improving efficiency in project management on the basis of three pioneering case studies: Crossrail (UK), Google Bay View (USA), and Melbourne Metro (Australia).

2. METHODOLOGY

The research uses a qualitative methodology based on a multiple case study design as recommended by Yin [2]. This type of design is appropriate for the study of phenomena concerning the "how" and "why" issues of recent times over which the researcher does not have much control. The use of a multiple case study provides cross-case analysis, which enhances validity due to the identification of patterns among projects.

2.1. Case Selection Criteria

Selection of the cases followed four distinct criteria. First, size of the project: only those projects with a total value above $500 million were chosen, since large-scale projects need more technological investment for managing their complexity and stakeholders. Second, BIM implementation: the project should feature the use of BIM Level 2 or higher, which implies using a Common Data Environment (CDE) and federated discipline models. Third, AI technology: projects had to be associated with the use of AI or ML techniques applied to project management functions including but not limited to scheduling, budget, quality, or safety management. Fourth, accessibility of data: cases should have publicly available reports or academic papers about them.

On the basis of these criteria, the following projects were identified: Crossrail / Elizabeth Line (London, United Kingdom, $18.9 billion) using predictive analytics; Google Bay View Campus (California, United States, $2.5 billion) using generative design; and Melbourne Metro Tunnel (Australia) using computer vision.

2.2. Data Collection

Data collection utilized a multi-source documentation review approach. These data sources included official project reports (such as Crossrail Learning Legacy), industry case studies (such as customer stories by Autodesk and CPB Contractors' reports), peer-reviewed scholarly journal articles, and trade press media reports. Each source used for quantitative claims was cited explicitly with the page number where relevant. Where there were contradictions among sources, the hierarchy of precedence was: official project reports first, then scholarly articles, followed by industry case studies, and finally trade press reports.

2.3. Data Analysis

The data analysis procedure consisted of two stages. The first, within-case analysis, entailed the following activities: organizing all data acquired about each case; descriptive coding for topics (context of the project, BIM approach, AI technology, implementation process, results obtained); and thematic coding to detect the patterns associated with the research questions. The second stage, cross-case analysis, comprised comparing the findings across the whole set of three cases.

3. RESULTS

3.1. Case A: Crossrail (Predictive Analytics)

Crossrail is a megaproject of major significance for Europe. It was a 118 km railway line which included 42 km of tunnel construction under London. The project was estimated to cost more than £18.9 billion and had more than 10,000 people working on it simultaneously.

The application involved BIM Level 2 deployment throughout the hierarchy, adopting a federated approach in the Common Data Environment. The use of AI in the project was mainly geared towards forecasting the schedule probabilistically with the help of machine learning algorithms. It was discovered that deterministic schedules, which have a single end date, were not adequate to handle the challenges of the project. The AI system involved Random Forest and Bayesian Networks combined with a 4D BIM schedule (over 50,000 activities) and other data sources.

The results presented by Crossrail Learning Legacy [3, p.47] demonstrate a 70% improvement in the time spent on risk detection compared to the manual method, with risk detection taking 2-3 weeks under the former approach compared to almost immediate detection through the use of AI. Moreover, there was an advance warning of possible project delays, approximately 4-8 weeks before they occurred [3, p.48]. It is necessary to note, however, that the project suffered considerable delays (it opened in 2022 rather than 2018) and cost overruns (increasing from £14.8 to £18.9 billion).

These were caused by the following reasons: the late introduction of the AI technology (AI pilots started in

2017, when the project had already accumulated many delays), organizational reluctance to work with probabilities [3, p.52], and external factors outside AI's sphere of influence (complicated geological conditions and disrupted supplies).

3.2. Case B: Google Bay View (Generative Design)

The Google Bay View campus is a three-story building, measuring 1.1 million square feet, and is an environmentally friendly construction. The building aimed to achieve sustainability targets that include cutting its embodied carbon emissions by half and obtaining net-zero water and net-zero carbon.

The designers would input their objectives (daylight maximization, energy efficiency, and minimizing MEP length) as well as constraints (structural grid, construction regulations, available materials), and the AI software would develop numerous possible designs.

The vendor [4, p.5] claims a cost saving of 10-15% in MEP material cost and a 30% reduction in conflict resolution time. The total embodied carbon saved is 50%, but that is due to the application of an integrated sustainability plan that includes all-electric systems, solar generation, a mass timber structure, and geothermal piles.

Elements that contributed to success include clearly defined optimization objectives, a parametric approach to BIM with adaptable models, parametric modelling and AI training for the team, and strong leadership.

3.3. Case C: Melbourne Metro (Computer Vision)

The Melbourne Metro Tunnel is an underground construction project in Australia in which two rail tunnels of 9 kilometres each are constructed. Important issues faced by management include progress tracking and safety compliance within the underground tunnel environment.

Contractor reports [6, p.8] indicate 80-90% faster progress reporting compared to manual methods, reducing reporting time from 3-5 days to near real-time. The same source notes an approximately 20% improvement in progress reporting accuracy [6, p.9].

Trade press [7, p.4] reports a 30% reduction in safety violations, though this figure comes from a secondary source rather than primary documentation and should be treated as indicative. Success factors included "light-touch" integration leveraging existing cameras (minimizing incremental cost), accurate as-planned BIM models, real-time alerts integrated with safety teams, and cloud-based processing that scaled with project needs.

3.4. Cross-Case Patterns

The cross-case analysis reveals four key patterns, summarized in Table 1.

Table 1. Cross-Case Patterns

Pattern	Finding
AI specialization	Target specific problems
BIM prerequisite	Level 2+ required
Attribution	Verify vendor claims
Human factors	Data quality + change management

Pattern 1: The application of AI technology depends on the specific problem being solved by the organization. In all cases, AI was applied to address a particular issue, such as the use of predictive analytics to mitigate schedule uncertainty and high-throughput computer vision applications. Therefore, successful use appears to demand that one first recognize a particular, high-value problem.

Pattern 2: The BIM maturity level is an essential precondition (taking into account its circular nature). BIM Level 2 or higher was reached prior to AI implementation in all three cases. Nevertheless, the result is partly circular, given that BIM Level 2+ was among the criteria used for selecting the case studies.

Pattern 3: Efficiency improvements are diverse but should be attributed properly. Enhancements were noted on all four dimensions of cost, time, quality, and safety. However, the information presented by vendors may not always be objective, as it serves marketing purposes, while certain accomplishments, such as the reduction of the carbon footprint by Google, were achieved through integration.

Pattern 4: The critical path depends on people and process. The biggest obstacles included data quality (according to Crossrail, 60% of AI implementation work was spent preparing data), change management (trusting AI outputs), and evolving roles (moving from data gatherers to analysts/decision makers).

4. DISCUSSION

The implications arising from the results of the three case studies are numerous and have significance not only for megaprojects but for any project, irrespective of its size and complexity. In order to realize the maximum benefit from the use of AI-enabled BIM, one should ensure that there are sufficient investments in improving data accuracy, conducting the necessary change management, and clearly identifying the underlying problems before deploying AI-enabled BIM technologies. Otherwise, such solutions will hardly prove useful, as the case of Crossrail shows. The same lesson applies to Google and Melbourne Metro, where success was directly tied to data quality, clear objectives, and organizational readiness. Figure 1 illustrates the cumulative efficiency gains over time across the three case studies.

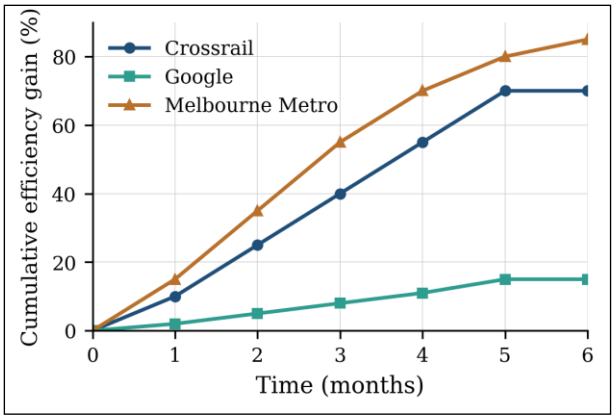


Figure 1. Cumulative efficiency gains over time across case studies

4.1. Theoretical Implications

This study provides empirical validation of existing BIM-AI integration frameworks, demonstrating that integration occurs at specific workflow nodes (scheduling, design coordination, site monitoring) rather than at an abstract project level. The findings also suggest that "efficiency" in AI-augmented systems should be redefined to include predictive accuracy, risk identification speed, option exploration breadth, and automation rate alongside traditional metrics such as SPI and CPI.

4.2. Practical Implications

For industry practitioners, three critical success factors emerge. First, BIM maturity (Level 2 or higher) is a prerequisite - AI cannot function effectively without structured, reliable data. Second, clear problem definition before AI selection is essential; each successful case applied a specific AI capability to a well-defined problem rather than adopting AI as a general solution. Third, investment in data quality and change management is critical; Crossrail estimated that 60% of implementation effort was data preparation, and all three cases required significant training and role evolution for project teams.

4.3. Transferability to Typical Projects

The cases analysed are megaprojects with budgets exceeding $2 billion and mature digital infrastructure. For typical projects ($10-100 million) with smaller budgets, several implications apply. The principle of strategic specialization applies regardless of scale. The BIM prerequisite translates to data quality, not necessarily full BIM Level 2. The Melbourne Metro model of "light-touch" integration (using existing cameras) is particularly relevant. However, vendor claims should be treated cautiously, as they may be based on megaproject conditions.

5. CONCLUSION

This paper demonstrates that AI-augmented BIM delivers measurable efficiency gains across cost, time, quality, and safety dimensions in large-scale construction projects. Crossrail achieved approximately 70% faster risk identification, Google achieved 10-15% MEP cost reduction, and Melbourne Metro achieved 80-90% faster progress reporting.

Based on the cross-case analysis, three main success factors can be identified: BIM maturity Level 2 or above as a necessary condition for integrating AI into the process; problem identification prior to AI selection, where AI is used to solve a particular issue; and data quality, along with change management such as training and the redefinition of project team members' roles.

Nevertheless, some limitations and attribution issues should be considered. The data provided by vendors can have promotional elements and should be viewed with some reservation. Some of the results (such as Google's emissions reduction) were achieved through a combination of measures and are not attributable to AI alone. The BIM maturity result is partially circular because BIM Level 2+ was part of the selection criteria. Finally, Crossrail's example shows that while AI gives timely warnings, it cannot prevent delays without implementation.

Future studies may explore the boundary conditions of BIM maturity by examining the use of AI in projects with lower BIM maturity; assess the difference between vendor-driven success and independently validated findings; monitor the adherence rate of the recommendations throughout the project life cycle; and create cost-benefit frameworks for small and medium enterprises (SMEs).

6. REFERENCES

[1] B. Flyvbjerg, "The iron law of megaproject management," in The Oxford Handbook of Megaproject Management. Oxford, UK: Oxford University Press, 2017.

[2] R. K. Yin, Case Study Research and Applications, 6th ed. Thousand Oaks, CA, USA: Sage Publications, 2018.

[3] Crossrail Ltd., "Integrated project controls," in Crossrail Learning Legacy. London, UK: Crossrail, 2019, pp. 45-63.

[4] Autodesk Inc., "Google Bay View Campus: Designing with data and nature," Autodesk Customer Stories, San Francisco, CA, USA, 2022.

[5] Google LLC, "Google Environmental Report 2022," Mountain View, CA, USA, 2022.

[6] CPB Contractors, "Digital engineering on the Melbourne Metro Tunnel Project," CPB Contractors Insights, Sydney, Australia, 2021.

[7] "Melbourne Metro Tunnel: Pioneering digital engineering in rail construction," Railway Technology, 2022.

Short Biography:

Ahmed Ataya Basheer Bouhuweesh was born in Tobruk, Libya, in 1995. He is a master's student at the Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, in the Organization and Building Technologies programme. He is expected to graduate in 2026.

Contact:
atayaahmedbasheer@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 624.01
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36CG07Lazarevic

Процена стања и енергетска санација стамбеног објекта у Лозници

Assessment and Energy Retrofit of a Residential Building in Loznica

Марина Лазаревић, Слободан Шупић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ГРАЂЕВИНАРСТВО

Кратак садржај: *Рад се састоји из два дела. Први део обухвата визуелни преглед и процену стања армиранобетонских елемената конструкције стамбеног приземног објекта, док се други део односи на прорачун енергетских својстава објекта и оцену класе енергетске ефикасности. На основу анализе регистрованих дефеката и оштећења, дат је предлог санационих мера у циљу обезбеђења трајности конструкције. На основу резултата прорачуна енергетских карактеристика, предложене су мере за унапређење енергетских перформанси објекта, пре свега применом одговарајуће термоизолације елемената термичког омотача.*

Кључне речи: *Процена стања, санација, АБ, стамбени објекат, енергетска ефикасност.*

Abstract: *The study consists of two parts. The first part includes a visual inspection and assessment of the reinforced concrete elements of the structure of a ground-floor residential building, while the second part refers to the calculation of energy efficiency characteristics of the building. Based on the analysis of the identified defects and damages, a proposal for repair measures is given aiming to ensure the durability of the structure. Also, based on the results of calculations presented in the energy efficiency report, measures for improving the energy performance of the building are defined, primarily through the application of appropriate thermal insulation of the building envelope.*

Keywords: *Assessment, repair, RC, residential building, energy efficiency.*

НАПОМЕНА: Овај рад је проистекао из мастер рада чији је ментор др Слободан Шупић, ванредни професор.

1. УВОД

Стање постојећих стамбених објеката условљено је како степеном очуваности конструктивних елемената, тако и нивоом енергетских перформанси термичког омотача зграде.

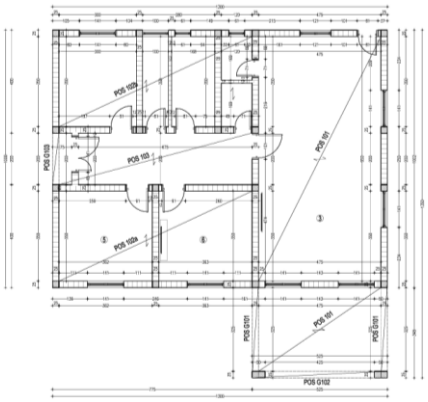
Услед дејства спољашњих утицаја и експлоатације долази до појаве различитих дефеката и оштећења бетона и армиранобетонске (АБ) конструкције, док недовољна термичка заштита узрокује повећане топлотне губитке и већу потрошњу енергије.

У циљу обезбеђивања сигурности, трајности и енергетске ефикасности објекта, неопходно је спровести детаљну процену стања постојеће конструкције, као и израдити елаборат енергетске ефикасности. На основу добијених резултата могу се дефинисати одговарајуће мере санације уочених оштећења и мере унапређења енергетских карактеристика објекта, чиме се продужава његов век употребе и побољшава квалитет боравка корисника.

Предмет овог рада је приземни стамбени објекат у Лозници. Рад обухвата: детаљан визуелни преглед носећих АБ елемената са регистрованим оштећењима и дефектима и оцену енергетских својстава објекта (укључујући оцену класе), у складу са Правилником о енергетској ефикасности зграда.

2. ОСНОВНИ ПОДАЦИ О ОБЈЕКТУ

Предметни приземни стамбени објекат у основи је оквирних димензија 13,00×10,00m, са терасом на западној страни (5,25×3,50m). Изградња објекта завршена је у мају, 2023. године. Карактеристична основа приказана је на наредној слици 1.



Слика 1. Основа приземља

Објекат је фундиран на армиранобетонским тракастим темељима. Зидови приземља озидани су клима керамичким блоковима (d=25cm) са вертикалним и хоризонталним АБ серклажима и гредама. Међуспратна конструкција изнад приземља изведена је као полумонтажна ФЕРТ таваница (16+4 cm). Кровна конструкција је дрвена, сложеног облика, покривена фалцованим црепом.

Према пројектно-техничкој документацији предвиђена је израда термоизолације спољашњих зидова објекта применом плоча од експандираног полистирена (EPS), међутим наведени радови до тренутка извршеног прегледа нису реализовани. Тренутно стање стамбеног објекта приказано је на наредној слици (Слика 2).



Слика 2. Тренутни изглед стамбеног објекта

3. ПРОЦЕНА СТАЊА АБ КОНСТРУКЦИЈЕ

Изласком на терен, најпре је извршена провера геометрије објекта и усклађеност са пројектним димензијама. Мерењем доступних димензија по висини и у основи, утврђено је да одговарају оним датим у пројекту. Након тога, извршен је детаљан визуелни преглед и снимање свих дефеката и оштећења, бележење њихових локација и карактеристичних детаља.

Уочена оштећења на спољашњим елементима објекта:

- Плитка бетонска гнезда,
- Рупичаста површина бетона,
- Флеке од влаге,
- Механичка оштећења,
- Пукотине и прслине у подној плочи.

Уочена оштећења у унутрашњости објекта:

- Флеке од влаге,
- Љускање завршног слоја са зидова и плафона,
- Прслине и пукотине.

Сва регистрована оштећења не нарушавају носивост, стабилност и употребљивост објекта, али делимично утичу на трајност. Већина оштећења је естетске природе.

На наредним сликама приказана су карактеристична оштећења и дефекти конструкције.



Слика 3. Бетонско гнездо и рупичаста површина на стубу



Слика 4. Површинско (плитко) бетонско гнездо и мрље од влаге



Слика 5. Одломљена ивица стуба, репрофилисана обичним цементним малтером



Слика 6. Појава влаге и љускање завршног слоја на плафону у купатилу

4. ЕНЕРГЕТСКА ЕФИКАСНОСТ ПОСТОЈЕЋЕГ СТАЊА

Након процене стања објекта приступило се оцени енергетских својстава постојећег стања објекта у складу са актуелним Правилником о енергетској ефикасности [3].

Основни подаци о објекту дати су у табели 1.

Табела 1. Основни подаци о објекту

Зграда:	☐ нова	■ постојећа
Врста зграде:	стамбена зграда са једним станом	
Место (локација):	кп. 13692 К.О. Лозница	
Година изградње:	мај, 2023.	
Година реконструкције / енергетске санације:	/	
Нето корисна површина грејаног дела зграде:	116,87 m^2	

Зграда је смештена у урбаној градској средини, тако да није под директним утицајем доминантних ветрова.

У објекту су обезбеђени одговарајући услови термичког, ваздушног и светлосног комфора захваљујући масивним зидовима, систему грејања и хлађења, природној вентилацији и довољном природном и вештачком осветљењу.

Прорачун је рађен на нетранспарентним позицијама (спољашњи зидови, подна плоча, међуспратна

конструкција) и транспарентним позицијама (прозори, врата).

У табели 2 приказане су вредности коефицијената пролаза топлоте кроз нетранспарентне и транспарентне површине.

Табела 2. Коефицијенти пролаза топлоте – постојеће стање

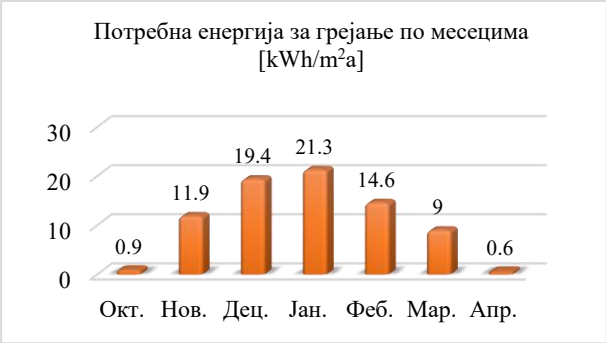
Положај	Ознака	U [W/(m²K)]	Umax [W/(m²K)]	Испуњено (ДА/НЕ)
Спољашњи зидови	СЗ	0,674	0,40	НЕ
МК испод негрејаног простора	МК испод НП	0,205	0,40	ДА
Под на тлу	ПОД	0,319	0,40	ДА
Прозори тип 1	ПР1	1,21	1,50	ДА
Прозори тип 2	ПР2	1,26	1,50	ДА
Прозори тип 3	ПР3	1,30	1,50	ДА
Прозори тип 4	ПР4	1,29	1,50	ДА
Врата тип 1	ВР1	1,184	1,50	ДА
Врата тип 2	ВР2	1,40	1,60	ДА
Врата тип 3	ВР3	1,20	1,60	ДА

Из приказаних резултата може се закључити да већина елемената термичког омотача објекта задовољава прописане максималне вредности коефицијента пролаза топлоте. Изузетак представљају спољашњи зидови, код којих је израчуната вредност коефицијента пролаза топлоте већа од дозвољене вредности. То указује на недовољна термоизолациона својства спољашњих зидова и представља један од главних узрока повећаних топлотних губитака објекта.

У даљем прорачуну извршена је анализа дифузије водене паре кроз конструктивне склопове, као и провера појаве међуслојне кондензације на основу притисака засићења и парцијалних притисака водене паре. Након тога су одређени укупни топлотни губици и добици објекта, на основу којих је израчуната потребна енергија за грејање.

На графику 1 приказане су годишње количине енергије потребне за грејање по месецима. Предвиђено је централно грејање објекта путем топлотне пумпе ваздух-вода.

График 1. Графички приказ потребне енергије за грејање по месецима за постојеће стање



Након даље анализе и имплементирања ових података у основни прорачун, а у складу са Правилником о условима, садржини и начину издавања сертификата о енергетским својствима зграда [4], утврђено је да објекат припада енергетском разреду Д (табела 3).

Табела 3. Табела енергетских разреда и разред који одговара предметном објекту у постојећем стању [4]

Зграде са једним станом		Постојеће
Енергетски разред	$Q_{H,nd,rel}$ [%]	$Q_{H,nd}$ [kWh/(m²a)]
A+	≤ 15	≤ 12
A	≤ 25	≤ 20
B	≤ 50	≤ 38
C	≤ 100	≤ 75
D	≤ 150	≤ 113
E	≤ 200	≤ 150
F	≤ 250	≤ 188
G	> 250	> 188
Грејање са прекидом	$Q_{H,nd,interm}$=	9069 kWh/a
	$q_{H,nd,interm}$=	77,6 kWh/m²a
	$Q_{H,nd,rel}$=	103,5%

5. МЕРЕ САНАЦИЈЕ У ЦИЉУ ПОБОЉШАЊА ЕНЕРГЕТСКЕ ЕФИКАСНОСТИ ОБЈЕКТА

Након извршеног прегледа објекта, израде елабората енергетске ефикасности за постојеће стање и утврђивања енергетског разреда, предложене су мере за унапређење енергетске ефикасности објекта и побољшање његових енергетских перформанси.

Као мера енергетске санације предвиђена је израда термоизолације спољашњих зидова, с обзиром на то да је анализом постојећег стања утврђено да они не задовољавају прописане захтеве у погледу коефицијента пролаза топлоте.

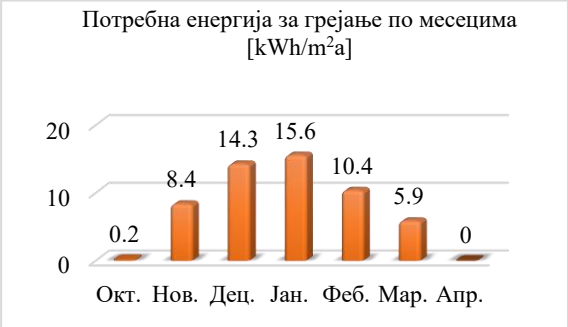
У циљу сагледавања ефеката различитих термоизолационих материјала, разматране су следеће варијанте санације:

1. Примена експандираног полистирена (EPS) као термоизолационог материјала;
2. Примена плоча од камене минералне вуне као термоизолационог материјала.

За обе варијанте санације поновљен је поступак прорачуна. Добијени резултати показали су да су у оба случаја вредности коефицијента пролаза топлоте спољашњих зидова усклађене са захтевима важећих прописа.

Након тога извршен је прорачун енергетских карактеристика објекта у стању након санације, а потребне количине енергије за грејање приказане су на графику 2.

График 2. Графички приказ потребне енергије за грејање по месецима за санирано стање



Даљим прорачуном, долази се до закључка да објекат након санације припада енергетском разреду Ц, што је приказано у табели 4.

Табела 4. Табела енергетских разреда и разред који одговара предметном објекту у санираном стању [4]

Зграде са једним станом		**Постојеће**
Е. разред	$Q_{H,nd,rel}$ [%]	$Q_{H,nd}$ [kWh/(m²a)]
A+	≤ 15	≤ 12
A	≤ 25	≤ 20
B	≤ 50	≤ 38
C	≤ 100	≤ 75
D	≤ 150	≤ 113
E	≤ 200	≤ 150
F	≤ 250	≤ 188
G	> 250	> 188
Грејање са прекидом	$Q_{H,nd,interm}$=	6410 kWh/a
	$q_{H,nd,interm}$=	54,90 kWh/m²a
	$Q_{H,nd,rel}$=	73,20 %

Економском анализом утврђено је да инвестициони трошкови извођења термоизолације применом експандираног полистирена (стиропора) износе 3.934€, при чему је процењени период повраћаја инвестиције око 8,6 година. Са друге стране, примена термоизолације од камене вуне захтева улагање од 5.058€, а период повраћаја инвестиције износи приближно 10,3 године.

На основу добијених резултата може се закључити да је варијанта са стиропором економски повољнија, с обзиром на ниже почетне трошкове и краћи период повраћаја инвестиције. С друге стране, примена камене вуне је оправдана са аспекта паропропусности зидова (здравија микро-клима унутар објекта) и отпорности на дејство високих температура.

6. МЕРЕ НЕКОНСТРУКЦИЈСКЕ САНАЦИЈЕ РЕГИСТРОВАНИХ ОШТЕЋЕЊА И ДЕФЕКАТА

С обзиром да су сва регистрована оштећења естетске природе и да не утичу на носивост и стабилност конструкције, предлажу се мере неконструкцијске санације које обухватају локалну репрофилацију површинских оштећења и бетонских гнезда репаратурним малтером, уклањање неправилности насталих на спојевима оплате, као и чишћење и уједначавање површине бетона. Такође, неопходно је отклонити узроке појаве влаге и извршити заштиту површина применом одговарајућих хидрофобних премаза (и/или пароисушивих малтера) ради спречавања поновног настанка оштећења.

7. ЗАКЉУЧАК

У раду су приказани резултати процене стања породичног стамбеног објекта, на коме је извршен детаљан визуелни преглед, те спроведен прорачун енергетских својстава објекта. Прорачуном је установљено да објекат припада енергетском разреду Д, те не испуњава захтеве дате у Правилнику о енергетској ефикасности. Енергетском санацијом објекта предвиђено је побољшање термичких карактеристика омотача објекта (додавањем слоја термоизолације), чиме је разред подигнут за један степен. Додатно, у раду су предложене и неконструкцијске мере санације објекта, у циљу обезбеђења пројектоване трајности.

8. ЛИТЕРАТУРА

[1] Проф. др Данијел Кукарас, Проф. др Слободан Шупић, предавања са предмета "Трајност и процења стања бетонских конструкција", Факултет техничких наука, Нови Сад, 2026.
[2] Проф. др Данијел Кукарас, Проф. др Иван Лукић, Проф. др Слободан Шупић, предавања са предмета "Санација бетонских конструкција", Факултет техничких наука, Нови Сад, 2026.
[3] "Правилник о енергетској ефикасности зграда", Сл. гласник РС, бр. 61/2011
[4] "Правилник о условима, садржини и начину издавања сертификата о енергетским својствима зграда", (Сл. гласник РС, бр. 69/2012, бр. 44/2018, 111/2022 и 102/2025)



Кратка биографија:

Марина Лазаревић рођена је 13.8.2001. године у Лозници. Основне академске студије грађевинарства завршила је 2024. године на Департману за грађевинарство и геодезију Факултета техничких наука у Новом Саду, а мастер рад из области Процена стања и енергетска ефикасност конструкције брани 2026. године.
Контакт: majalazarevic01@gmail.com



Слободан Шупић рођен је 1989. године у Требињу у БиХ. Од 2013. године запослен је на Факултету техничких наука, а од 2025. ради као ванредни професор на Департману за грађевинарство и геодезију, ужа научна област: Грађевински материјали, процена стања и санација конструкција.

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 624.05
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36CG08Tepavcevic

Упоредна анализа традиционалних и хибридних опораца за мостове применом вишекритеријумског одлучивања

Comparative Analysis of Traditional and Hybrid Bridge Abutments Using Multi-Criteria Decision-Making Methods

Јована Тепавчевић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ТЕХНОЛОГИЈА И ОРГАНИЗАЦИЈА ГРАЂЕЊА

Кратак садржај – *У раду је приказана упоредна анализа традиционалних армиранобетонских и хибридних опораца типа армираног тла применом метода вишекритеријумског одлучивања. Анализа је спроведена на примеру моста у Триполију кроз вредновање техничких, економских и геотехничких критеријума. Резултати TOPSIS и LCC анализа показали су да хибридни систем остварује боље укупне перформансе у односу на традиционални систем опораца.*
Кључне речи: *мостови, опорци, вишекритеријумска анализа, армирано тло*

Abstract– *This paper presents a comparative analysis of traditional reinforced concrete abutments and hybrid Reinforced Earth bridge abutments using multi-criteria decision-making methods. The analysis was conducted through a case study of a bridge project in Tripoli, considering technical, economic and geotechnical criteria. The results of TOPSIS and Life-Cycle Cost analyses show that the hybrid system provides better overall performance than the traditional solution.*

Keywords: *bridges, bridge abutments, multi-criteria analysis, reinforced earth*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Милан Тривунић, ред.проф.

1. УВОД

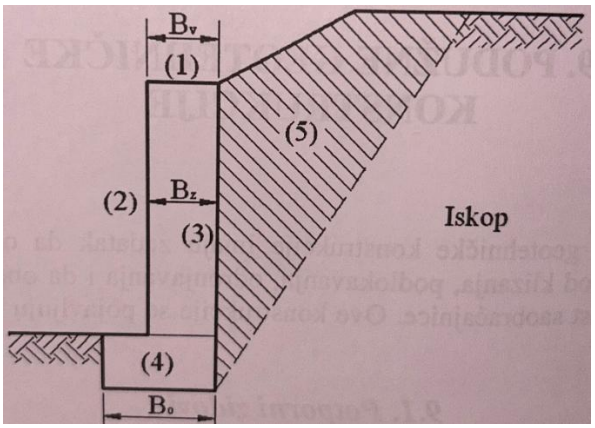
Избор оптималног типа опорца представља један од значајних задатака у процесу пројектовања мостова, јер директно утиче на стабилност конструкције, начин преноса оптерећења, трошкове изградње и понашање објекта током експлоатације. Опорци имају кључну улогу у обезбеђивању сигурног преноса вертикалних и хоризонталних оптерећења са мостовске конструкције на темељно тло, па њихов избор значајно утиче на укупне перформансе и трајност моста.
Поред традиционалних армиранобетонских опораца, који су дуго представљали стандардно решење у мостоградњи захваљујући својој крутости и поузданости, у савременој пракси све већу примену налазе хибридни системи засновани на технологији армираног тла. Ови системи омогућавају ефикасније коришћење материјала, бржу изградњу и боље прилагођавање неповољним геотехничким условима, што их чини атрактивном алтернативом конвенционалним решењима.
С обзиром на различите конструктивне, економске и функционалне карактеристике ових система, њихово вредновање не може се заснивати само на једном критеријуму. Због тога је неопходно применити методе вишекритеријумског одлучивања које омогућавају истовремено разматрање више фактора и објективније доношење одлука.
Циљ рада је упоредна анализа традиционалних и хибридних опораца применом Life-Cycle Cost (LCC) и TOPSIS метода на примеру изградње моста у Триполију. Кроз анализу техничких, економских и геотехничких критеријума извршено је рангирање разматраних алтернатива и утврђено које решење показује најповољније укупне перформансе за посматране услове изградње.

2. УПОРЕДНА АНАЛИЗА ОПОРАЦА МОСТОВА

2.1. Анализирана конструктивна решења

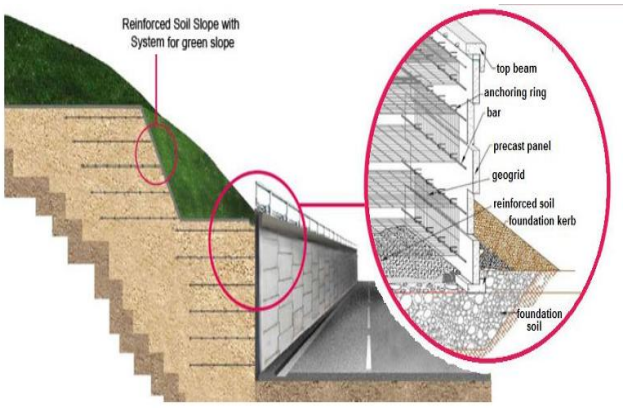
У раду су разматрана два конструктивна решења мостовских опораца. Прву алтернативу представља класични армиранобетонски опорац изведен методом бетонирања на лицу места, док другу алтернативу представља хибридни опорац, заснован на технологији армираног тла.
Традиционални армиранобетонски опорци представљају једно од најчешће примењиваних решења у мостоградњи због дугогодишњег искуства у пројектовању и експлоатацији. Њихова основна предност огледа се у високој носивости и добро познатом конструктивном понашању, што омогућава једноставнију контролу прорачуна и извођења. Међутим, велики сопствени терет конструкције доводи до повећаних притисака на темељно тло, што може представљати ограничење код објеката који се граде на слабим геотехничким подлогама [1,4]. На

приказаној слици 1 можемо видети основне геометријске елементе овог система.



Слика 1. Геометријски елементи традиционалног армиранобетонског опорца [1]

Са друге стране, код хибридног система носивост се остварује кроз интеракцију насипа и армирајућих елемената, док бетонски панели имају претежно заштитну и архитектонску функцију. Овај приступ доводи до значајно мањих притисака на темељно тло и повољније расподеле напона у конструкцији [2,3]. Са слике 2, можемо видети принцип функционисања оваквог типа система.



Слика 2. Принцип функционисања хибридних система [2]

2.2. Критеријуми вредновања

За потребе анализе дефинисани су критеријуми који обухватају конструктивне, технолошке и економске аспекте. Усвојени су критеријуми приказани у Табели 1.

Табела 1. Критеријуми коришћени у TOPSIS анализи

Ознака	Критеријум	Тип
K1	Потрошња материјала	минимизација
K2	Стабилност	максимизација
K3	Брзина извођења	максимизација
K4	Сложеност извођења	минимизација
K5	Деформације и слегања	оптимизациони
K6	Инспекција и контрола	максимизација
K7	Life-Cycle Cost (LCC)	минимизација

Анализирани критеријуми омогућавају свеобухватно вредновање конструктивних решења, јер обухватају не само почетне трошкове изградње већ и понашање система током читавог животног века конструкције**.**

2.3. Студија случаја – мост у Триполију

Практична анализа спроведена је на примеру изградње моста у урбаном подручју Триполија. Пројекат карактеришу ограничени просторни услови, значајна саобраћајна оптерећења и сложени геотехнички услови, што избор типа опорца чини једним од кључних проблема пројектовања.

Код традиционалног система утврђена је укупна количина бетона од приближно 37,4 m³, док хибридни систем захтева око 9,2 m³ бетона. На овај начин остварено је смањење потрошње бетона од приближно 75 %, што представља значајну предност у погледу економичности и одрживости.

Са аспекта технологије грађења, традиционални систем захтева израду оплате, армирање, бетонирање и време неопходно за очвршћавање бетона. Хибридни систем омогућава континуирано извођење кроз слојевито насипање, уградњу арматуре и монтажу панела, услед чега је извођење радова значајно брже [3].

Анализа деформација и слегања показала је да хибридни систем боље подноси неравномерна слегања захваљујући својој флексибилности, док су традиционални системи осетљивији на диференцијална слегања због своје крутости. Ово представља значајну предност при изградњи на слабијим и хетерогеним темељним тлима [5].

Табела 2. Сумарно поређење анализираних система

Критеријум	A1	A2	Предност
Потрошња материјала	Висока	Ниска	A2

Стабилност	Веома висока	Висока	A1
Брзина извођења	Спора	Врло брза	A2
Деформације и слегања	Неповољније	Повољније	A2
Контрола квалитета	Једноставнија	Сложенија	A1
LCC	Виши	Нижи	A2

Из приказаних резултата види се да хибридни систем остварује предност у већини анализираних критеријума, док традиционални систем задржава предност у погледу стабилности и контроле квалитета.

Посматрани пројекат представља типичан пример урбаног инфраструктурног објекта код кога се истовремено јављају високи захтеви у погледу носивости, ограничен простор за изградњу и потреба за скраћивањем рокова реализације. У таквим условима избор опорца не утиче само на цену конструкције већ и на организацију градилишта, употребу механизације и динамику извођења радова [4].

Поред техничких карактеристика, код савремених инфраструктурних пројеката све већи значај имају критеријуми одрживости и утицаја на животну средину. С обзиром да хибридни систем користи знатно мању количину бетона и већи удео локалног насипног материјала, његова примена може допринети смањењу емисије угљен-диоксида током изградње и транспортних трошкова материјала [3,5].

2.4. Резултати LCC и TOPSIS анализе

У циљу економског вредновања конструктивних решења спроведена је Life-Cycle Cost анализа. У обзир су узети почетни трошкови изградње, трошкови одржавања, санација, ризика отказа и краја животног циклуса конструкције. Добијени резултати приказани су у Табели 3.

Табела 3. Резултати LCC анализе

Систем	Укупни LCC (€)
A1	≈ 30.400
A2	≈ 20.900

Хибридни систем остварује приближно 31 % ниже трошкове током животног циклуса конструкције, пре свега захваљујући нижим трошковима одржавања и једноставнијим санационим интервенцијама.

За коначно рангирање алтернатива примењена је TOPSIS метода. Након нормализације критеријума и примене тежинских коефицијената добијени су коефицијенти блискости идеалном решењу приказани у Табели 4.

Табела 4. Резултати TOPSIS анализе

Алтернатива	Коефицијент блискости C	Ранг
A2	0,742	1
A1	0,258	2

Резултати показују да алтернатива A2 има значајно већу блискост идеалном решењу. Предност је остварена пре свега захваљујући мањој потрошњи материјала, бржем извођењу, повољнијем понашању при слегањима и нижим трошковима током животног циклуса објекта.

TOPSIS метода омогућила је истовремено разматрање више критеријума различите природе и њихово обједињавање у јединствени модел одлучивања. За разлику од избора заснованог на само једном критеријуму, као што је цена изградње или стабилност, оваквим приступом је могуће сагледати укупан квалитет сваког решења и донети објективнију инжењерску одлуку [4].

Добијени резултати потврђују да хибридни систем остварује предности у већини анализираних критеријума, док традиционални армиранобетонски опорац остаје конкурентно решење у случајевима када су крутост конструкције, могућност инспекције и висок степен контроле квалитета доминантни захтеви пројекта [1,4].

3. ЗАКЉУЧАК

Спроведена анализа показала је да хибридни опорци типа армирано тло представљају веома конкурентно решење у савременој мостоградњи. У односу на традиционалне армиранобетонске опорце остварују значајно мању потрошњу материјала, бржу изградњу, повољније понашање при слегањима и ниже трошкове током животног циклуса конструкције.

Са друге стране, традиционални системи задржавају предности у погледу крутости, робусности и једноставније контроле квалитета. Због тога избор оптималног решења мора бити прилагођен конкретним пројектним условима, геотехничким карактеристикама локације и захтевима инвеститора.

Резултати TOPSIS анализе показали су да хибридни систем остварује коефицијент блискости идеалном решењу од 0,742, док традиционални систем има вредност 0,258.

На основу тога може се закључити да је за анализирани случај моста у Триполију хибридни систем оптимално решење. Примена метода вишекритеријумског одлучивања показала се као ефикасан инструмент за доношење објективних и технички оправданих инжењерских одлука.

Посебан значај спроведеног истраживања огледа се у примени реалних пројектних података и истовременом разматрању већег броја критеријума који утичу на избор конструктивног решења. Комбиновањем техничких, економских и геотехничких показатеља омогућено је свеобухватније сагледавање предности и ограничења анализираних система, што представља поузданију основу за доношење инжењерских одлука у односу на приступе засноване на једном критеријуму.

Добијени резултати потврђују да системи од армираног тла имају значајан потенцијал за ширу примену у савременој мостоградњи, посебно у условима слабих темељних тла, потребе за убрзаном изградњом и захтева за смањењем трошкова током експлоатације објекта. Захваљујући својој флексибилности и способности прилагођавања слегањима, ови системи могу представљати економично и технички оправдано решење у бројним инфраструктурним пројектима. Иако хибридни систем у анализи показује боље укупне резултате, традиционални армиранобетонски опорци и даље имају значајну улогу у пракси, нарочито код објеката са високим захтевима у погледу крутости конструкције, контроле квалитета и дугорочне предвидивости понашања. Стога се избор оптималног система не може посматрати универзално, већ мора бити условљен специфичностима сваког појединачног пројекта.

На крају, може се закључити да примена метода вишекритеријумског одлучивања омогућава рационалнији и објективнији избор мостовских опораца, уз истовремено уважавање техничких, економских и експлоатационих захтева. Овакви приступи могу значајно допринети оптимизацији пројектантских решења и унапређењу процеса доношења одлука у савременој мостоградњи.

4. ЛИТЕРАТУРА

[1] Dragan Č. Lukić, Petar V.Anagnosti. *Geotehnika saobraćajnica.* Beograd : s.n., 2010.

[2] Bonić, Prof. dr Zoran. Potporne konstrukcije. (pristupljeno u julu 2026.) https://project.gaf.ni.ac.rs/ecivil/sites/default/files/2020-03/Potporne%20konstrukcije%201_prof.%20Zoran%20%20Bonic.pdf.

[3] Reinforced Earth Company Ltd. Bridge Abutments. Reinforced Earth Company Ltd., Mississauga, Ontario, Canada. Dostupno u tehničkom priručniku „Bridge Abutments“

[4] AASHTO. *LRFD Bridge Design Specifications*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., USA.

[5] Schlosser, F., Guilloux, A., Long, N.T., Vegaey, J. Reinforced Earth Bridge Abutments. Terre Armée Internationale, Paris, France. Technical Paper No. 5.01, Reinforced Earth Bridge Abutments.

Кратка биографија:



Јована Тепавчевић рођена је у Новом Саду 2001. год. Мастер рад на тему „Упоредна анализа традиционалних и хибридних опораца за мостове применом вишекритеријумског одлучивања“ на Факултету техничких наука из области Грађевинарства одбранила је 2026. године.
Контакт: tepavcevicj01@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 69:658
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36CG09Sunjevic

Компаративна анализа временске ефикасности израде техничке документације у традиционалном и BIM приступу

Comparative Analysis of Time Efficiency in Traditional and BIM Technical Documentation Approaches

Марко Шуњевић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ГРАЂЕВИНАРСТВО

Кратак садржај – *Истраживање у раду је спроведено кроз компаративну анализу временске ефикасности израде техничке документације применом два приступа традиционалног 2D и BIM методологије. Кључни елементи истраживања су спроведени кроз студију случаја на истом објекту и са идентичним пројектним захтевима. Анализирано је време потребно за израду графичке документације, прорачуна, увођење измена и завршну контролу документације. Резултати показују да BIM приступ омогућава значајно смањење времена израде документације, нарочито у фазама ревизије и координације пројекта. Утврђено је да интегрисани модел представља ефикасан алат за унапређење продуктивности и смањење ризика од грешака у процесу пројектовања.*
Кључне речи: *BIM, техничка документација, дигитализација.*

Abstract – *The research presented in the paper was conducted through a comparative analysis of the time efficiency of technical documentation development using two approaches: the traditional 2D method and BIM methodology. The key elements of the research were examined through a case study based on the same building project and identical design requirements. The analysis included the time required for the preparation of graphical documentation, structural calculations, implementation of design modifications, and final documentation review. The results indicate that the BIM approach enables a significant reduction in the time required for technical documentation development, particularly during the revision and project coordination phases. Furthermore, the study confirmed that an integrated digital model represents an effective tool for improving productivity and reducing the risk of errors throughout the design process.*

Keywords: *BIM, technical documentation, digitalization.*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Игор Пешко, ред. проф.

1. УВОД

Техничка документација представља један од кључних елемената у процесу пројектовања и извођења грађевинских објеката, јер обезбеђује пренос информација између различитих учесника у пројекту. Њена тачност, потпуност и благовременост директно утичу на динамику реализације радова, квалитет извођења и могућност појаве грешака током изградње. Традиционални приступ изради техничке документације заснива се на 2D цртежима и пратећим табеларним приказима, који се најчешће развијају као међусобно неповезани документи. У таквом систему, свака измена пројектног решења захтева ручну корекцију већег броја цртежа, ажурирање количина и додатне провере међусобне усаглашености документације. Као последица тога, процес израде и ревизије документације постаје временски захтеван и повећава се ризик од појаве неусклађености између графичког и нумеричког дела пројекта.

Развој дигиталних технологија у грађевинарству довео је до појаве BIM (*Building Information Modeling*) методологије, која уводи модел-центричан приступ заснован на јединственом дигиталном моделу објекта. За разлику од традиционалног приступа, у BIM окружењу геометријски и информациони подаци интегрисани су у оквиру централног модела, из кога се генеришу цртежи, количине, предмери и остали делови техничке документације. Оваква организација процеса омогућава ефикасније управљање изменама, смањење броја поновљених активности и повећање конзистентности документације.

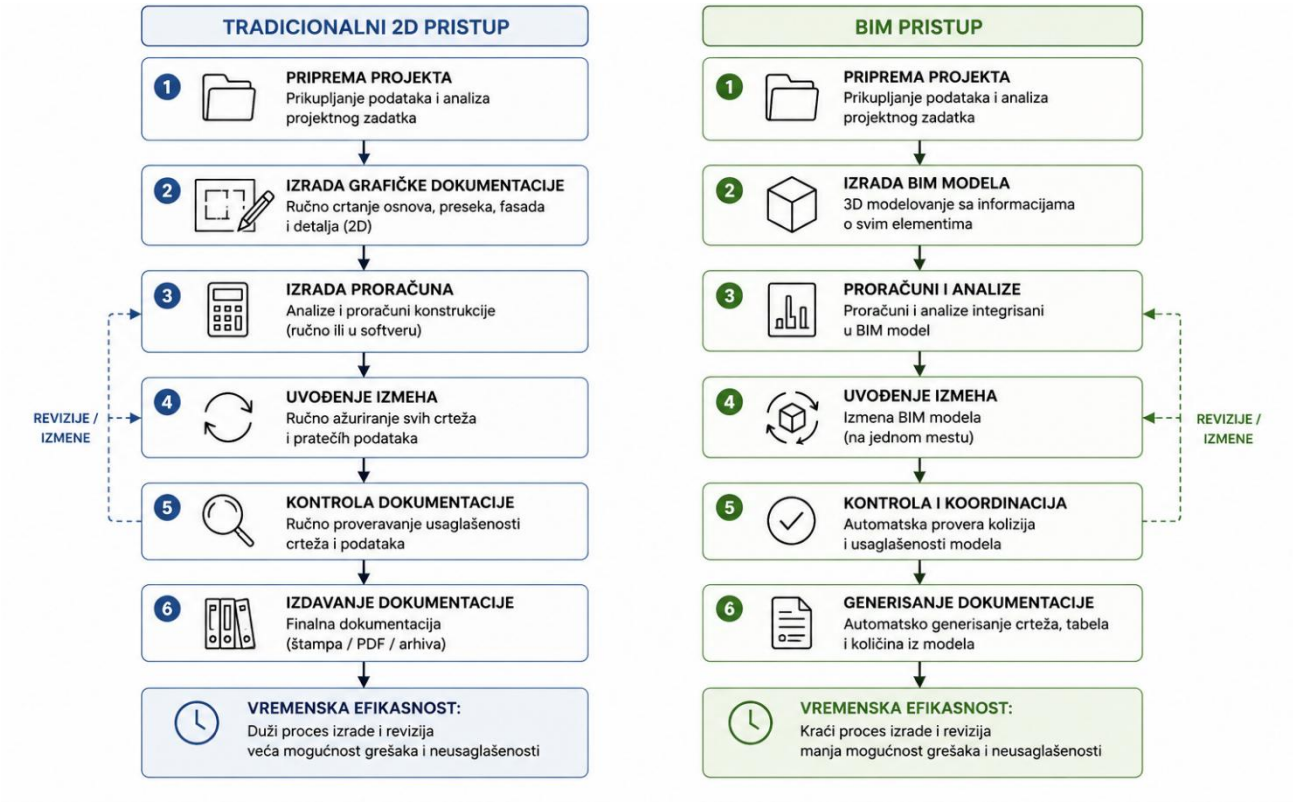
Иако је примена BIM методологије све присутнија у савременој грађевинској пракси, њен утицај на временску ефикасност израде техничке документације, посебно у фази документације за извођење, и даље захтева додатну квантитативну анализу. Због тога је циљ овог рада да кроз компаративну студију случаја анализира утицај BIM приступа на време израде техничке документације у односу на традиционални 2D приступ.

Истраживање је спроведено на примеру индивидуалног стамбеног објекта спратности P+1, при чему је пет инжењера са искуством у AutoCAD и Autodesk Revit окружењу израдило исти обим техничке документације применом оба приступа. На основу реално измереног времена рада извршено је поређење појединачних фаза процеса и утврђен утицај организације рада и управљања пројектним информацијама на укупну временску ефикасност.

2. РАЗВОЈ ТЕХНИЧКЕ ДОКУМЕНТАЦИЈЕ И ДИГИТАЛНА ТРАНСФОРМАЦИЈА У ГРАЂЕВИНАРСТВУ

Развој техничке документације у грађевинарству пратио је развој грађевинских технологија, сложеност објеката и потребу за прецизнијим управљањем пројектним информацијама. Од првобитних ручно израђених цртежа и занатског преноса знања, развијен је стандардизован систем техничких цртежа који је током двадесетог века постао основни инструмент комуникације између пројектаната и извођача.

Увођење CAD система представљало је значајан корак у дигитализацији пројектантског процеса, јер је омогућило бржу и прецизнију израду техничких цртежа [1]. Ипак, иако је процес цртања унапређен, основна организација рада остала је непромењена. Цртежи и табеларни прикази и даље су постојали као засебни документи, због чега је свака пројектна измена захтевала ручно ажурирање више делова документације.



Слика 1. Компаративни приказ традиционалног и BIM приступа.

Са повећањем сложености грађевинских пројеката, оваква организација процеса показала је значајна ограничења у погледу времена израде, контроле верзија и међусобне усаглашености пројектних информација. Потреба за интегрисаним приступом управљању подацима довела је до развоја BIM методологије, која представља прелаз са документације засноване на независним цртежима ка модел-центричном приступу [2].

BIM не представља само технолошки напредак у односу на CAD системе, већ промену начина организације пројектантског процеса. Дигитални модел објекта постаје централни носилац геометријских и информационих података, што омогућава бољу координацију, већу поузданост техничке документације и ефикасније управљање изменама током пројектовања и извођења.

2.1. BIM методологија и организација пројектних информација

Building Information Modeling (BIM) представља савремени приступ пројектовању који се заснива на изради јединственог дигиталног модела објекта, у коме су обједињене геометријске карактеристике елемената, техничке особине, количине материјала и друге информације неопходне током целокупног животног циклуса објекта [3]. За разлику од традиционалног приступа, где је техничка документација састављена од већег броја међусобно независних цртежа, BIM приступ користи централни модел као основни извор свих пројектних информација.

Једна од најважнијих карактеристика BIM методологије је повезаност свих елемената унутар модела. Свака измена извршена на моделу аутоматски се одражава на све повезане приказе, као што су основе, пресеци, фасаде, детаљи и количински извештаји [4]. На овај начин се смањује потреба за ручним ажурирањем документације, што у великој мери смањује могућност настанка грешака и неусаглашености између појединих цртежа.

Примена BIM приступа омогућава бољу координацију учесника у процесу пројектовања и извођења, јер сви учесници имају приступ јединственом извору података о објекту [5]. Поред тога, BIM модел омогућава аутоматско генерисање различитих врста техничке документације, као што су цртежи, спецификације и

предмери, што доприноси повећању ефикасности пројектантског процеса.
Посебан значај BIM методологије огледа се у управљању изменама током развоја пројекта. Док код традиционалног приступа измена једног елемента често захтева ручну корекцију великог броја цртежа и табела, код BIM модела измене се спроводе централизовано, а све зависне информације се аутоматски ажурирају [6]. Управо ова карактеристика представља један од главних разлога за временске уштеде које BIM приступ може остварити у процесу израде техничке документације.

2.2. Методологија истраживања и студија случаја

У циљу квантитативне анализе утицаја BIM методологије на време израде техничке документације, спроведено је истраживање засновано на компаративној практичној студији случаја. Истраживање је обухватило поређење два различита методолошка приступа изради техничке документације: традиционалног приступа заснованог на 2D цртању у AutoCAD окружењу и модел-центричног BIM приступа заснованог на изради дигиталног модела у Autodesk Revit окружењу.
Као предмет анализе изабран је индивидуални стамбени објекат спратности P+1, правилне геометрије, габаритних димензија приближно 9,18 × 7,65 m. Објекат је садржао све основне елементе неопходне за реално поређење процеса израде техничке документације, укључујући основе, пресеке, фасаде, детаље, као и предмере и количине.
Истраживање је спроведено уз учешће пет инжењера са претходним искуством у раду у оба софтверска окружења. Сваки учесник је добио идентичан пројектни задатак и израдио комплетну техничку документацију применом оба приступа. На тај начин елиминисан је утицај различите сложености пројекта, обима документације и улазних података, чиме је омогућено да се добијене разлике у времену рада припишу искључиво разликама у организацији процеса и начину управљања пројектним информацијама.
Током израде документације вршено је реално мерење времена потребног за извршење свих активности, укључујући иницијалну израду цртежа и модела, увођење пројектних измена, усаглашавање документације, израду предмера и количина, као и завршну контролу пројектног пакета. Време је евидентирано за сваког учесника појединачно, при чему периоди паузе и неактивног рада нису укључени у коначне резултате.
Посебна пажња посвећена је смањењу утицаја фактора који могу нарушити објективност поређења. Из тог разлога, део учесника је најпре радио традиционалним приступом, док је други део прво применио BIM методологију, чиме је смањен утицај претходног познавања пројектног решења и ефекта учења.
Овако дефинисан методолошки оквир омогућио је реално поређење временске ефикасности два приступа. Резултати су анализирани кроз поређење времена потребног за појединачне фазе рада, као и кроз интегрално поређење укупног времена израде техничке документације. На основу оваквог приступа било је могуће утврдити у којим фазама процеса BIM методологија остварује највеће предности у односу на традиционални начин израде документације.

3. РЕЗУЛТАТИ КОМПАРАТИВНЕ АНАЛИЗЕ ВРЕМЕНА ИЗРАДЕ ТЕХНИЧКЕ ДОКУМЕНТАЦИЈЕ

Резултати спроведеног истраживања показали су значајне разлике у временској ефикасности између традиционалног 2D приступа и модел-центричног приступа заснованог на BIM методологији. На основу анализе резултата пет инжењера (Табела 1.), који су под идентичним условима израдили исти пројектни задатак применом оба приступа, утврђено је да је просечно укупно време израде техничке документације у традиционалном приступу износило приближно 86 часова, док је у BIM приступу износило око 40 часова. Остварена временска уштеда од приближно 53% представља јасан показатељ утицаја организације пројектног процеса и начина управљања информацијама на ефикасност израде документације.

Табела 1. Резултати израде техничке документације

Учесник	*Традиционални приступ (h)*	*BIM приступ (h)*
Инжењер 1	86	39.75
Инжењер 2	80	37
Инжењер 3	93	44
Инжењер 4	76	34.75
Инжењер 5	95	43.75
Просечно време	86 h	39,85 ≈ 40 h

Детаљнија анализа појединачних фаза рада показала је да разлике нису равномерно распоређене током целокупног процеса. У фази иницијалне израде документације разлике су мање изражене, јер оба приступа захтевају дефинисање геометрије, просторне организације и техничких решења објекта. Међутим, најзначајније временске уштеде остварене су у фазама увођења пројектних измена, усаглашавања документације и израде количина и предмера.
Код традиционалног приступа, свака измена пројектног решења захтева корекцију већег броја независних цртежа, поновно котирање, ажурирање количина и додатне провере усаглашености документације. Насупрот томе, у BIM окружењу измене се уносе на нивоу централног дигиталног модела, након чега се сви повезани графички и нумерички прикази аутоматски ажурирају. Оваква организација процеса значајно смањује број поновљених активности и скраћује трајање ревизионих циклуса.
Посебно изражена разлика уочена је у сегменту израде количина и предмера. Просечно време потребно за израду и усаглашавање прогачуна у традиционалном приступу износило је приближно 18 часова, док је у BIM приступу било око 4,75 часова, што представља смањење времена од око 74%. Ова разлика проистиче из чињенице да су у BIM моделу количине директно повезане са елементима модела и аутоматски се ажурирају након сваке измене.
Укупна анализа резултата показује да основна предност BIM методологије није искључиво у бржем

генерисању цртежа, већ у фундаментално другачијој организацији процеса пројектовања. Централизацијом информација, елиминацијом вишеструког уноса података и аутоматизацијом ажурирања документације постиже се већа временска ефикасност, боља конзистентност пројектних података и смањење ризика од грешака током даљих фаза реализације објекта.

4. ДИСКУСИЈА И ЗАКЉУЧАК

Добијени резултати истраживања потврђују да примена модел-центричног приступа на бази BIM методологије има значајан утицај на повећање временске ефикасности процеса израде техничке документације. Упоредна анализа традиционалног 2D приступа и BIM приступа показала је да главна предност BIM методологије не произилази искључиво из примене напредних софтверских алата, већ пре свега из другачије организације процеса рада и начина управљања пројектним информацијама.

Резултати студије случаја показали су да је за анализирани стамбени објекат спратности P+1 укупно време потребно за израду техничке документације смањено са приближно 86 часова у традиционалном приступу на приближно 40 часова применом BIM методологије. Остварена временска уштеда од око 53% посебно је изражена у фазама увођења пројектних измена, усаглашавања цртежа и израде количина и предмера, где интегрисани дигитални модел омогућава аутоматско ажурирање повезаних приказа и значајно смањује потребу за ручним корекцијама.

Ови резултати су у складу са савременим истраживањима која BIM посматрају као методологију усмерену ка интеграцији информација, побољшању координације учесника у пројекту и оптимизацији процеса израде документације. Централизација података у оквиру јединственог модела смањује ризик од неусаглашености између графичког и нумеричког дела документације, што доприноси већој поузданости пројектних решења и смањењу броја ревизионих циклуса.

Иако је истраживање спроведено на објекту мање сложености, добијени резултати указују да су предности BIM методологије присутне и код релативно једноставних пројеката. Може се претпоставити да би код сложенијих објеката, који обухватају већи број пројектних дисциплина и чешће измене током развоја документације, временске и организационе предности BIM приступа биле још израженије.

Као ограничење истраживања потребно је истаћи да је анализа спроведена на једном типу објекта и ограниченом броју учесника, због чега добијене резултате није могуће у потпуности генерализовати на све врсте грађевинских пројеката. Ипак, чињеница да су сви учесници истог пројектног задатка доследно остварили боље временске резултате применом BIM приступа указује на стабилност добијених закључака.

На основу спроведене анализе може се закључити да BIM методологија представља ефикасан приступ савременој изради техничке документације, јер омогућава смањење времена рада, већу контролу над пројектним информацијама, смањење ризика од грешака и бољу предвидљивост процеса пројектовања. Резултати овог истраживања потврђују постављену хипотезу да примена BIM приступа значајно доприноси рационализацији процеса израде техничке документације у односу на традиционални 2D начин рада.

5. ЛИТЕРАТУРА

[1] N. Bredella, “Simulation and Architecture: Mapping Building Information Modeling,” *NTM Zeitschrift für Geschichte der Wissenschaften, Technik und Medizin*, vol. 27, no. 4, pp. 419–441, Dec. 2019, doi: 10.1007/s00048-019-00224-9.

[2] B. C. Matos, C. O. Cruz, and F. Branco, “Digitalization and procurement in construction projects: An integrated BIM-based approach,” *Journal of Information Technology in Construction*, vol. 29, pp. 400–423, May 2024, doi: 10.36680/j.itcon.2024.019.

[3] A. Borrmann, M. König, C. Koch, and J. Beetz, Eds., *Building Information Modeling: Technology Foundations and Industry Practice*. Cham: Springer International Publishing, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-92862-3.

[4] Z. Pučko, N. Šuman, and U. Klanšek, “Building Information Modeling Based Time and Cost Planning in Construction Projects,” *Organization, Technology and Management in Construction: An International Journal*, vol. 6, no. 1, 2014, doi: 10.5592/otmcj.2014.1.6.

[5] U. Isikdag, “Building Information Models: An Introduction,” in *Enhanced Building Information Models*, ser. SpringerBriefs in Computer Science. Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 1–12, doi: 10.1007/978-3-319-21825-0_1.

[6] Ž. Ljevo, M. Pozder, S. Sulejmanović, S. Albinović, A. Šarić, and A. Borić, “Enhancing Construction Project Management Using BIM,” in *Advanced Technologies, Systems, and Applications X*, ser. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 1625, N. Ademović, Z. Akšamija, and A. Karabegović, Eds. Cham: Springer Nature Switzerland, 2026, pp. 435–446, doi: 10.1007/978-3-032-05159-2_27.

Кратка биографија:



Марко Шуњевић рођен је у Приштини 1992. год. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Грађевинарства – Компаративна анализа временске ефикасности израде техничке документације у традиционалном и BIM приступу одбранио је 2026.год.

Контакт: msunjevic92@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 624:005.334
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36CG10Gong

Анализа главног уговора и управљање ризицима на пројекту фабрике гума у Србији

Main Contract Analysis and Risk Management for a Tire Factory Project in Serbia

Гонг Ји, Факултет техничких наука, Нови Сад

Студијски програм – ГРАЂЕВИНАРСТВО

Кратак садржај – Овај рад има за циљ да истражи управљање уговором и ризицима на пројекту фабрике гума у Србији према моделу пројектовања и изградње (D+B). Као један од највећих страних инвестиционих пројеката у Србији, пројекат се суочава са сложеним међународним уговорним окружењем, кратким роковима и великим техничким изазовима. Коришћењем анализе случаја и методе матрице ризика, студија дубоко анализира ризике уговора у оквиру примене FIDIC Жуте књиге, техничке ризике донете сложеном геологијом и челичним конструкцијама, као и ризике прекограничне логистике. За решавање ових кључних тачака ризика, рад предлаже специфичне мере укључујући стратегије фазне испоруке, примену софтвера P6, локализовану набавку и побољшану правну усклађеност. Резултати показују да систематско управљање ризицима значајно повећава отпорност великих међународних инжењерских пројеката.

Кључне речи: Управљање пројектима, FIDIC, Ублажавање ризика, Фабрика гума

Abstract – *This paper explores the contract and risk management of the tire factory project in Serbia under the Design-Build (D+B) general contracting model. As one of the largest foreign investments in Serbia, the project faces a complex international contract environment, tight schedules, and formidable technical challenges. Using case analysis and the risk matrix method, the study deeply analyzes contract risks under the application of the FIDIC Yellow Book, technical risks brought by complex geology and large-scale steel structures, and cross-border logistics and supply chain risks. To address these core risk points, this paper proposes specific countermeasures including phased delivery strategies, the application of P6 schedule management software, localized procurement, and strengthened legal compliance. The findings demonstrate that systematic risk management significantly enhances the resilience and performance capability of large international engineering projects.*

Keywords: *Project Management, FIDIC, Risk Mitigation, Tire factory*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Игор Пешко, ред. проф.

1. УВОД

Са континуираним напретком иницијативе „Појас и пут”, број инжењерских пројеката у иностранству које преузимају кинеска предузећа значајно се повећао. Пројекат фабрике гума у Србији представља референтни велики индустријски пројекат у који је инвестирало кинеско предузеће у Европи. Са укупном инвестицијом од око милијарду америчких долара, пројекат обухвата око 100 хектара земљишта и веома велико главно производно постројење са пратећим објектима.

Пројекат усваја модел општег уговарања „пројектовање и изградња” (D+B) са фиксном јединичном ценом, директно се позивајући на широко признате услове уговора FIDIC Жуте књиге[1]. Послујући у сложеном међународном уговорном окружењу, везан строгим европским инжењерским стандардима и управљајући укрштеним интересима више заинтересованих страна, извођач преузима вишеструке одговорности које обухватају оптимизацију пројекта и извођење радова[2]. Превазилажење озбиљних изазова у вези са технологијом, логистиком и уговорним механизмима у оквиру агресивно кратког рока од само 15 месеци кључно је за успех пројекта. Овај рад има за циљ да систематски идентификује основне тачке ризика пројекта и предложи циљане мере за ублажавање ризика, пружајући теоријску подршку и практичне референце за повећање отпорности реализације међународних инжењерских уговора.

2. АНАЛИЗА РИЗИКА

На основу основних клаузула уговора и стварних услова на градилишту, и коришћењем методологије матрице ризика, ова студија идентификује следећа три основна домена ризика:

2.1. Уговорни ризици засновани на FIDIC Жутој књизи

Модел уговора који подразумева пројектовање и изградњу захтева од извођача да буде у потпуности

одговоран за тачност пројекта и одступања у предмеру и предрачуну радова (BoQ). Уговор користи структуру „привремени предмер + фиксна јединична цена" и прописује строгу одговорност за кршење уговора.

Ризик одлагања рокова и високих пенала (Liquidated Damages): Укупан период изградње предвиђен уговором је само 15 месеци. Уколико дође до кашњења из разлога повезаних са извођачем, биће наплаћена дневна уговорена казна у износу од 0,1% од укупне цене уговора, са максималним ограничењем које достиже 20% вредности уговора[3]. Ова екстремна казна имплицира да би кашњења на било ком критичном путу могла у потпуности да потроше профитне марже пројекта.

Ризик флуктуације девизног курса: Уговор је процењен у еврима (EUR), али се измирује у српским динарима (RSD). Пошто уговор не садржи клаузулу о прилагођавању цене за флуктуације девизног курса, извођач мора сам да сноси финансијске ризике повезане са девалвацијом валуте или озбиљном волатилношћу девизног курса.

2.2. Технички ризици и изазови имплементације на градилишту

Смештен у равничарском подручју северне Србије, пројекат се суочава са значајним техничким ризицима изазваним природним окружењем и сложеним интерфејсима приликом примопредаје[4].

Сложена геологија и метеоролошка ограничења: Плитак ниво подземних вода у подручју постројења (3,5 до 7 метара испод земље) озбиљно омета велике земљане радове и изградњу темеља. Поред тога, регион често доживљава јединствени ветар Кошава, који експоненцијално повећава оперативне ризике на великим висинама током подизања и инсталације велике челичне конструкције главног производног постројења.

Ризик преузимања постојећих радова: Од извођача се захтева да преузме делимично завршене радове које је оставио претходни подизвођач. Неуспех у темељној истрази и документовању потенцијалних недостатака у квалитету (као што су слегање темеља или одступања уграђених делова) резултираће тиме да нови извођач сноси солидарну одговорност током накнадне изградње и током дугог гарантног рока од 5 до 10 година.

2.3. Ризици логистике и ланца снабдевања

Као масивни индустријски пројекат, стабилност ланца снабдевања материјалима и опремом је од највеће важности.

Вишеструки стандарди и препреке у набавци: Уговор налаже да материјали буду у складу са српским (SRPS) стандардима, док критичне компоненте морају да испуњавају европске (EN) или америчке стандарде и обезбеде CE сертификат.

Дугорочна кашњења у прекограничној логистици: Велика количина нестандардних челичних компоненти и електро механичке опреме у великој мери зависи од увоза, што захтева претовар преко суседних лука у земљама попут Хрватске. Гломазне процедуре царињења и геополитичке неизвесности лако доводе до поремећаја у ланцу снабдевања, што покреће кашњења у распореду.

3. УБЛАЖАВАЊЕ РИЗИКА

Да би се систематски одговорило на сложене ризике идентификоване изнад, пројектни тим је имплементирао свеобухватан оквир за ублажавање ризика током фазе извршења уговора. Овај оквир се фокусира на строгу контролу распореда, отпорност ланца снабдевања, напредне техничке безбедносне протоколе и снажно управљање усклађеношћу. Детаљан резиме стратегија ублажавања приказан је у Табели 1.

Табела 1. Матрица за ублажавање основних ризика за пројекат фабрике гума

Ризик	Категорија	Мера ублажавања
Девизни ризик (EUR/RSD, без клаузуле о прилагођавању)	Финансијски	Терминска куповина и закључавање цена; локализација набавке
Кашњење и пенали (0,1%/дан, макс. 20%)	Рокови	Primavera P6 динамичко планирање; фазна испорука; праћење критичне путање
Преузимање постојећих радова претходног извођача	Технички/квалитет	NDT испитивање; извештаји о затеченим недостацима; формализоване варијације
Сложена геологија и ветар Кошава	Технички/безбедност	Анемометарски сензори на дизалицама; модуларна монтажа на земљи
Прекогранична логистика и вишеструки стандарди	Ланац снабдевања	Локализација набавке (EU/CE); резервни добављачи
Виша сила и климатска кашњења	Уговорни	Строга контрола докумената; благовремени EOT захтеви (рок 14 дана)

3.1. Напредно P6 управљање распоредом и фазна испорука

Да би се супротставио екстремном року од 15 месеци и озбиљној клаузули о пеналима од 0,1% дневно, извођач је прешао са традиционалног планирања на динамичко главно планирање користећи Primavera P6.

Праћење критичног пута и временске резерве: Систем је покретао паралелне распореде за Секције 1, 3, 4 и 5. Сталном анализом временске резерве, менаџерски тим је успоставио окидаче за рано упозорење који су аутоматски означавали активности које заостају пре него што су могле да утичу на критичну основну путању пројекта.

Нивелисање ресурса и фазна примопредаја: Пројекат је усвојио стратегију фазне испоруке. Ресурси су били снажно концентрисани на Секцију 4 (највећи обим зграде на >80.000 m²) током периода ван шпица осталих секција. Оваква расподела је спречила локална уска грла у ресурсима и омогућила делимичне примопредаје, задовољавајући ране оперативне потребе Инвеститора и ублажавајући укупни ризик распореда.

3.2. Локализација ланца снабдевања и финансијски хеџинг

Да би се неутралисале двоструке претње од прекограничних логистичких кашњења и флуктуација девизног курса евро-динар, пројекат је драстично реконструисао свој ланац снабдевања.

Стратешка локализација: Основана је наменска оперативна група за набавку како би се идентификовали и ревидирали добављачи у Србији и ширем балканском региону који поседују ЕУ ЦЕ сертификате. Пребацивање набавке расутих материјала (нпр. бетона и стандардног челика) на локална тржишта драстично је смањило време испоруке и заобишло сложена царинска уска грла.

Терминска куповина и закључавање цена: Користећи авансно плаћање од 35% предвиђено уговором, извођач је извршио терминске уговоре за критичне материјале када су тржишне цене биле повољне. Ова стратегија финансијског хеџинга ефективно је закључала трошкове материјала, ублажавајући ризик од инфлације и неповољних флуктуација валута током животног циклуса пројекта.

3.3. Инжењерске заштитне мере и контрола активности високог ризика

С обзиром на еколошке и наслеђене изазове, стандардна административна безбедност била је недовољна. Извођач је имплементирао превентивне контроле на нивоу инжењеринга.

Дигитализована отпорност на ветар и модуларна монтажа: Да би се изборио са јаким ветровима Кошаве у региону, извођач је поставио сензоре анемометра повезане са контролним системима дизалица. Ако су удари ветра премашили безбедносне прагове, операције подизања на великим висинама су аутоматски закључане. Штавише, челична конструкција главног производног постројења користила је методологију „монтаже на земљи, модуларног подизања", минимизирајући изложеност радника опасностима на великим висинама.

Вишестепене ревизије интерфејса: Након преузимања радова од претходног извођача, ангажоване су треће стране да спроведу тестирање без разарања (NDT) и посматрања слегања. Резултирајући „Извештаји о постојећим недостацима" су правно формализовани и предати Инвеститору, успешно изолујући новог извођача од наслеђених обавеза квалитета и претварајући неопходне санационе радове у одобрене варијације.

3.4. Правна усклађеност и управљање захтевима

У оквиру FIDIC-а, педантна администрација уговора је ултимативна одбрана од неконтролисаних ризика.

Виша сила и захтеви за продужетак рока (EOT): Успостављен је строг систем контроле докумената за поткрепљивање захтева. Када су изузетне временске прилике (нпр. велике поплаве) зауставиле земљане радове, тим је одмах прикупио метеоролошке податке и издао званична обавештења о продужењу рока унутар предвиђеног рока од 14 дана, успешно класификујући климатска кашњења као оправдана и избегавајући пенале[5].

Свеобухватно осигурање: Извођач је задржао пуне лимите осигурања од свих ризика извођача (CAR) и осигурања од одговорности према трећим лицима (TPL). Ово је осигурало да било какву катастрофалну физичку штету или непредвиђене обавезе апсорбује тржиште осигурања, а не крајњи резултат пројекта[6].

4. ЗАКЉУЧАК

У сложеном и променљивом спољном окружењу, пројекат фабрике гума у Србији успешно је испунио своје масивне инжењерске обавезе кроз D+B модел. Ова студија показује да када се суочите са притисцима распореда у оквиру FIDIC система уговора, сложеним техничким потешкоћама на градилишту и прекограничним логистичким изазовима, ослањање искључиво на побољшање технологије изградње на градилишту је недовољно.

Спровођењем рафинираног P6 распореда за фазну испоруку, локализованим реструктурирањем ланца снабдевања и дубинском усклађеношћу уговора и управљањем захтевима, извођач је успешно трансформисао потенцијалне уговорне кризе у контролне елементе пројекта. Ове систематске мере управљања и ублажавања ризика не само да су гарантовале несметано напредовање пројекта у оквиру буџета и строгих временских оквира, већ су пружиле и драгоцено практично искуство за повећање укупне отпорности великих међународних инжењерских пројеката. Коначно, овај свеобухватни приступ наглашава изванредне инжењерске способности и способности управљања ризицима потребне за успех на глобалној сцени.

5. ЛИТЕРАТУРА

[1] FIDIC (Међународна федерација инжењера консултаната), Услови уговора за постројења и

пројектуј-изгради (Жута књига), прво издање 1999. Женева: FIDIC, 1999.

[2] Y. Cai, G. Guo, M. Chen и Y. Hu, „Анализа модела уговарања Пројектуј и изгради”, Инжењерски дизајн и конструкција, вол. 6, бр. 2, стр. 44–47, 2024.

[3] Q. Zhang, H. Ye и L. Yu, Практичне стратегије за решавање спорова у општем инжењерском уговарању (DB/EPC). Пекинг: China Architecture & Building Press, 2019.

[4] N. J. Smith, T. Merna и P. Jobling, Управљање ризицима у грађевинским пројектима, 3. изд. Оксфорд: Wiley-Blackwell, 2014.

[5] M. Zhang, „Ризик власника и виша сила у међународном инжењерству”, Међународна економска сарадња, бр. 10, стр. 66–69, 2010.

[6] B. Tumubang, „Кратка дискусија о управљању ризицима безбедности у грађевинарству”, 2021.

Кратка биографија:

Гонг Ји рођен је у Сечуану (Кина) 1986. године. Мастер рад на Факултету техничких наука у Новом Саду, из области Грађевинарства – Организација и технологија грађења, одбранио је 2026. године.

Контакт:pascalgongyi@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 628.16
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36HZ01Stevanovski

Анализа утицаја пожара на депонијама на животну средину

Environmental Impact Assessment of Landfill Fires

Александра Стевановски, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ИНЖЕЊЕРСТВО ЗАШТИТЕ ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ

Кратак садржај – *Рад се бави проблемом пожара на депонијама комуналног отпада, који представљају значајан ризик за животну средину и здравље људи. У раду су анализирани узроци и механизми настанка пожара на депонијама, као и њихови негативни утицаји на ваздух, земљиште и воду. Посебан фокус стављен је на савремене методе превенције и управљања овим пожарима. Истраживање обухвата преглед иновативних технологија за рану детекцију и мониторинг, као што су системи за праћење температуре и гасова, термалне камере, дронови и дигитални системи раног упозоравања. Примена ових технологија омогућава правовремено откривање потенцијалних пожара и смањење њихових последица. Значај истраживања огледа се у унапређењу система управљања депонијама и смањењу ризика од настанка пожара.*

Кључне речи : *пожари на депонијама, комунални отпад, превенција пожара, мониторинг пожара, савремене технологије*

Abstract – *The thesis addresses the problem of landfill fires, which represent a significant risk to the environment and human health. The paper analyzes the causes and mechanisms of landfill fire occurrence, as well as their negative impacts on air, soil, and water. Special attention is given to modern methods of prevention and management of such fires. The research includes an overview of innovative technologies for early detection and monitoring, such as temperature and landfill gas monitoring systems, thermal cameras, drones, and digital early warning systems. The application of these technologies enables timely detection of potential fires and reduces their consequences. The importance of this research lies in improving landfill management systems and reducing the risk of fire occurrence.*

Keywords: *Landfill fires, minucipal solid waste, fire prevention, fire monitoring, modern technologies*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Дејан Убавин, ред. проф.

1. УВОД

Депоније комуналног отпада представљају значајан елемент система управљања отпадом, али истовремено могу представљати извор различитих еколошких проблема. Један од најозбиљнијих ризика који се јавља на депонијама јесте појава пожара, који могу настати као последица сложених физичко – хемијских и биолошких процеса у отпаду. Током разградње органске материје долази до стварања депонијског гаса, пре свега метана, који у одређеним условима може довести до самозапаљења или експлозије. Поред тога, пожари могу настати и услед спољашњих фактора као што су људска непажња, неадекватно одлагање запаљивих материјала или неповољни метеоролошки услови [1], [5].

Пожари на депонијама могу имати озбиљне последице по животну средину и здравље људи. Сагоревањем отпада ослобађају се различите штетне материје које загађују ваздух, воду и земљиште, док дим и токсични гасови могу изазвати респираторне и друге здравствене проблеме код становништва у близини депонија. Због тога је разумевање механизама настанка пожара и примена адекватних мера превенције од кључног значаја за безбедно управљање депонијама [2].

У последње време све већу улогу у превенцији и контроли пожара имају савремене технологије које омогућавају ранију детекцију потенцијалних жаришта и ефикаснији мониторинг депонија. Примена система за праћење температуре, концентрације депонијског гаса, као и употреба термалних камера и беспилотних летелица омогућавају идентификацију ризичних зона и правовремено реаговање. Ове технологије представљају значајан корак ка унапређењу система управљања депонијама и смањењу ризика од настанка пожара [6], [7].



Слика 1. Пожар на депонији

Циљ овог рада је анализа настанка пожара на депонијама, њиховог утицаја на животну средину и здравље људи, као и преглед савремених технологија

које се користе у циљу њихове превенције и раног откривања.

2. МЕХАНИЗМИ НАСТАНКА ПОЖАРА НА ДЕПОНИЈАМА, УЗРОЦИ И ФАКТОРИ

Пожари на депонијама најчешће настају као последица сложених фактора, хемијских и биолошких процеса који се одвијају у телу депоније. Током разградње органског отпада долази до стварања топлоте и депонијског гаса, пре свега метана и угљен – диоксида. У случају повећане температуре и присуства кисеоника може доћи до самозапаљења отпада, што представља један од најчешћих механизама настанка пожара на депонијама [3], [4], [7].

Поред процеса разградње отпада, значајну улогу у настанку пожара имају и спољашњи фактори. Међу њима се издвајају људски фактор, неправилно одлагање запаљивих материја или одбачени опушци, као и високе температуре током летњих месеци (метеоролошки услови). Такође, присуство запаљивих гасова унутар депоније може довести до њиховог запаљења и ширења пожара кроз слојеве отпада, што додатно отежава његово гашење [5], [6].

Додатни фактори који утичу на појаву пожара укључују лоше управљање депонијом, недовољно прекривање отпада и недостатак система за контролу депонијског гаса. У таквим условима долази до акумулације запаљивих гасова и повећања температуре унутар депоније, што значајно повећава ризик од избијања пожара. Због тога је идентификација узрока и фактора ризика од великог значаја за планирање ефикасних превентивних мера и безбедно управљање депонијама [3], [7].

Пожари на депонијама се посебно често јављају на дивљим депонијама и на депонијама које не испуњавају услове санитарног одлагања отпада. На таквим локацијама отпад се најчешће одлаже без адекватне контроле, без система за прикупљање депонијског гаса и без редовног прекривања отпада, што значајно повећава ризик од настанка пожара. Поред тога, неконтролисано одлагање различитих врста отпада и одсуство система мониторинга додатно доприносе настанку и ширењу пожара. Због тога пожари на оваквим депонијама могу имати још израженије негативне последице по животну средину, јер долази до неконтролисаног ослобађања штетних гасова и загађујућих материја које могу значајно нарушити квалитет ваздуха, земљишта и воде [3].

3. ВРСТЕ ПОЖАРА НА ДЕПОНИЈАМА

Пожари на депонијама могу се поделити на површинске и подповршинске, у зависности од места настанка и начина ширења пожара. Површински пожари настају на површини депоније и најчешће захватају отпад који је директно изложен ваздуху. Ова врста пожара карактерише се видљивим пламеном, бржим ширењем и већом количином дима. Површински пожари могу настати услед људске непажње, одлагања запаљивих материјала, неконтролисаног паљења отпада или утицаја високих температура и сувих временских услова [3], [6].

Подповршински пожари, познати и као тињајући пожари, настају унутар тела депоније и развијају се без јасно видљивог пламена. Они се јављају као последица биолошких и хемијских процеса разградње отпада, током којих долази до постепеног повећања температуре и могућег самозапаљења. Ови пожари се често шире споро, али могу трајати дуго и тешко се откривају и гасе, јер се жаришта налазе дубоко унутар депоније. Због тога подповршински пожари представљају један од најсложенијих проблема у управљању депонијама и захтевају примену система за континуирани мониторинг температуре и депонијског гаса [4], [6], [7].



Слика 2. Тињајући пожар на депонији – подповршински пожар



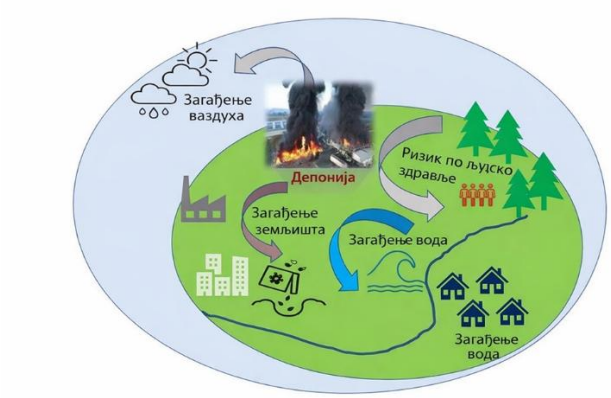
Слика 3. Пламтећи пожар на депонији – површински пожар

4. УТИЦАЈ ПОЖАРА НА ДЕПОНИЈАМА НА ЖИВОТНУ СРЕДИНУ И ЗДРАВЉЕ ЉУДИ

Пожари на депонијама представљају значајан извор загађења ваздуха јер током сагоревања отпада долази до емисије штетних гасова и честица, укључујући угљен – моноксид, угљен – диоксид, азотне оксиде и фине суспендоване честице. Поред тога, сагоревање различитих врста отпада може довести до ослобађања токсичних једињења као што су диоксини и фурани, који имају дуготрајан негативан утицај на животну средину. Ове емисије могу допринети погоршању квалитета ваздуха и представљати озбиљан ризик за здравље становништва у близини депоније [2], [6].

Поред загађења ваздуха, пожари на депонијама могу имати негативан утицај и на земљиште и водне ресурсе. Током пожара долази до стварања загађених процедних вода и таложења штетних материја на

површини земљишта, што може довести до контаминације подземних и површинских вода. Дуготрајно излагање диму и токсичним гасовима може изазвати различите здравствене проблеме код људи, укључујући респираторне проблеме, иритацију очију и коже, као и повећан ризик од хроничних болести. Због тога пожари на депонијама представљају озбиљан еколошки и здравствени ризик који захтева адекватне мере превенције и контроле [2], [7].



Слика 4. Утицај пожара на депонијама на животну средину

С обзиром на значајне негативне утицаје пожара на депонијама, неопходно је спроводити одговарајуће мере за смањење ризика и последица ових догађаја. Неке од основних мера укључују правилно управљање отпадом, контролу и сакупљање депонијског гаса, редовно прекривање отпада инертним материјалом и континуирани мониторинг температуре и емисија гасова. Поред тога, важно је спроводити редовне инспекције депонија и примену система за рану детекцију потенцијалних жаришта, како би се омогућила правовремена реакција и спречило ширење пожара. Применом ових мера може се значајно смањити ризик од пожара и ублажити њихов негативан утицај на животну средину и здравље људи [3], [6].

5. САВРЕМЕНЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ ЗА ПРЕВЕНЦИЈУ ПОЖАРА НА ДЕПОНИЈАМА

Савремене технологије имају значајну улогу у превенцији и раном откривању пожара на депонијама. Једна од кључних мера је континуирани мониторинг параметара унутар тела депоније, као што су температура и концентрација депонијског гаса. Праћењем ових параметара могуће је на време уочити промене које указују на повећан ризик од самозагревања отпада и потенцијалног настанка пожара. Правовремена идентификација ових процеса омогућава предузимање превентивних мера и смањење ризика од већих пожара [3], [4], [7].

Поред система за мониторинг у последње време се све више развијају и примењују технологије даљинског надзора депонија. Употреба термалних камера и беспилотних летелица (дронова) омогућава идентификацију повишених температура и потенцијалних жаришта на великим површинама депонија. Овакве технологије омогућавају брзу детекцију проблема и ефикасније планирање интервенција, чиме се значајно унапређује систем превенције и контроле пожара на депонијама [8], [9].

Поред система за праћење температуре и концентрације депонијског гаса, у савременој пракси све више се примењују и дигитални системи за рану детекцију пожара. Ови системи користе комбинацију различитих сензора и софтверских алгоритама који анализирају прикупљене податке и омогућавају благовремено откривање потенцијалних жаришта. На основу прикупљених информација могуће је предвидети повећање ризика од настанка пожара и правовремено предузети мере за његово спречавање. Интеграција оваквих система са технологијама даљинског надзора значајно доприноси унапређењу управљања депонијама и смањењу вероватноће појаве пожара [7], [10].

6. ЗАКЉУЧАК

Пожари на депонијама представљају значајан еколошки и безбедносни проблем који може имати озбиљне последице по животну средину и здравље људи. Они настају као резултат сложених процеса разградње отпада, стварања депонијског гаса и утицаја различитих спољашњих фактора, као што су неправилно управљање отпадом и неповољни временски услови. Због тога је разумевање механизама настанка пожара од великог значаја за њихову превенцију и ефикасну контролу.

Пожари на депонијама доводе до емисије штетних гасова и токсичних материја које могу значајно нарушити квалитет ваздуха, земљишта и воде. Поред негативних утицаја на животну средину, они могу представљати и ризик по здравље становништва, посебно у насељима која се налазе у близини депонија. Због тога је неопходно унапређивати систем управљања отпадом и спроводити мере које ће смањити могућност настанка оваквих инцидената.

Примена савремених технологија за мониторинг и рано откривање потенцијалних жаришта представља важан корак у превенцији пожара на депонијама. Системи за праћење температуре и концентрације депонијског гаса, као и употреба термалних камера и беспилотних летелица, омогућавају благовремену идентификацију ризичних зона и ефикасније управљање депонијама. Унапређење ових система може значајно допринети смањењу ризика од пожара и заштити животне средине и здравља људи.

7. ЛИТЕРАТУРА

[1] Singh D., Nema R.K. Municipal Solid Waste Management and Disposal, 2015.

[2]Siddiqua A., Hahladakis J.N., Al-Attiya W.A.K.A. An overview of the environmental pollution and health effects associated with waste landfilling and open dumping, 2022.

[3] Manjunatha G.S., Lakshmikanthan P., Kumar R. Detection and extinguishment approaches for municipal solid waste landfill fires: A mini review, 2023.

[4] Moqbel S. Characterizing spontaneous fires in landfills, 2009.

[5] Mikalsen R.F. et al. Fires in waste facilities: Challenges and solutions from a Scandinavian perspective, 2020.

[6] Dąbrowska M., et al. Causes, types and consequences of municipal waste landfill fires, 2022.

[7] Milošević L., Mihajlović E., Đorđević A., Protić M., Ristić D. Identification of fire hazards due to landfill gas generation and emission, 2017.

[8] Sedano-Cibrian J. et al. 4D models generated with UAV photogrammetry for landfill monitoring thermal control of MSW landfills, 2023.

[9] Tanda G. et al. A UAV-Based thermal imaging approach for the monitoring of urban landfills, 2020.

[10] Rajeev Kumar Shakya: Landfill fire prediction and prevention system using machine learning model in case of Ethiopia, 2023.

Кратка биографија:



Александра Стевановски рођена је у Новом Саду 2001. год. Мастер рад на Факулету техничких наука из области Инжењерства заштите животне средине одбранио је 2026.год.
Контакт:
astevanovskiii@gmail.com

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 502/504
ДОИ: https://doi.org/10.24867/36HZ02Reljin

Квантитативна процена нивоа транспарентности ESG извештавања у индустријском сектору

Quantitative Assessment of ESG Reporting Transparency in the Industrial Sector

Татјана Рељин, Маја Петровић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ИНЖЕЊЕРСТВО ЗАШТИТЕ ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ

Кратак садржај – *Овај рад представља квантитативну процену транспарентности ESG извештавања у индустријском сектору. Анализа је заснована на јавно доступним ESG извештајима и примени „scorecard“ модела са четири критеријума: примену стандардизованих ESG оквира, екстерну верификацију, квантификоване циљеве одрживости и јасно дефинисане кључне индикаторе перформанси KPI са базном годином. Истраживање је усмерено на еколошке индикаторе као што су емисије гасова са ефектом стаклене баште, потрошња енергије, воде и управљање отпадом. Резултати показују разлике између међународних и домаћих компанија, при чему компаније у оквиру ЕУ регулаторног оквира ESRS показују виши ниво транспарентности.*

Кључне речи: *KPI, ESG, транспарентност, индустрија, „scorecard“ метод*

Abstract – *This paper presents a quantitative assessment of the transparency of ESG reporting in the industrial sector. The analysis is based on publicly available ESG reports and applies a scorecard model with four criteria: usage of standardized ESG frameworks, external verification, quantified sustainability targets, and clearly defined key performance indicators (KPIs) with a base year. The study focuses on environmental indicators such as greenhouse gas emissions, energy and water usage, and waste management. The results show clear differences between international and domestic companies, with firms in the EU regulatory framework ESRS demonstrating higher transparency and methodological consistency. The findings suggest that standardized reporting frameworks and external verification improve the credibility and comparability of ESG disclosures.*

Keywords: *KPIs, ESG, transparency, industry, scorecard method*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је била др Маја Петровић, ванр. проф.

1. УВОД

Савремени пословни амбијент карактерише растући значај ESG (енг. *Environmental, Social, Governance*) концепта као оквира за процену одрживости и одговорног пословања компанија. Посебно је изражена потреба за транспарентним извештавањем у индустријским секторима са високим еколошким утицајем [1,2]. Развој ESG извештавања додатно је институционализован кроз регулаторне иницијативе Европске уније, пре свега кроз директиву о корпоративној одрживости (енг. *Corporate Sustainability Reporting Directive,* CSRD) и Стандардни европски сет обавезних правила за извештавање о одрживости у ЕУ (енг. *European Sustainability Reporting Standards*, ESRS), чиме извештавање о одрживости прелази из добровољне у нормативно уређену праксу [3].

У литератури се све чешће поставља питање да ли ESG извештавање заиста доприноси унапређењу еколошких перформанси или представља претежно комуникациони инструмент према инвеститорима и другим заинтересованим странама [4,5]. Полазећи од овог проблема, рад анализира ниво транспарентности ESG извештавања у индустријском сектору и разлике између међународних и домаћих компанија кроз три истраживачка питања (ИП1–ИП3).

ИП1: У којој мери ESG извештавање доприноси унапређењу еколошких перформанси (CO_2, енергија, вода и отпад)?

ИП2: Који механизми обезбеђују транспарентност и тачност ESG извештаја?

ИП3: Како се међународне и домаће компаније разликују у квалитету ESG извештавања и перформансама?

2. ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

Табела 1. Преглед одабраних студија о ESG извештавању

Аутори	Година	Кључни налази
Zahid и др. [6]	2022	ESG стандарди повећавају транспарентност и поверење инвеститора
Clément и др. [7]	2022	Методолошке разлике отежавају поређење ESG перформанси

Goldklang и др. [8]	2023	Регулатива утиче на квалитет ESG извештавања
Вао и др. [9]	2024	Виши ESG скор повезан са бољим еколошким перформансама
Liu и др. [10]	2023	Екстерна верификација повећава кредибилитет ESG података

Емпиријска истраживања показују да ESG праксе могу допринети смањењу емисија и повећању оперативне ефикасности, али су резултати хетерогени и често зависе од методологије мерења [4,5]. Посебан проблем представља недостатак јединствених стандарда, што отежава поређење међу компанијама [5]. Студије указују да ESG има дугорочно позитиван репутациони ефекат, али може повећати краткорочне трошкове [6]. Методолошке разлике у процени ESG перформанси додатно отежавају упоредивост резултата [7]. Регулаторни оквир има значајан утицај на квалитет ESG извештавања [8], док неусаглашеност ESG рејтинга може повећати финансијски ризик, посебно у загађујућим индустријама [9]. Екстерна верификација ESG података доприноси већем кредибилитету објављених информација [10]. Истраживања такође указују на ризик од тзв. „greenwashing"-а услед селективног извештавања [11].

У контексту индустрије, на примеру више сектора, цементна индустрија фокусира се на смањење клинкера и емисија угљен-диоксида [12], док фармацеутски сектор наглашава управљање водом и енергетску ефикасност као кључне елементе смањења утицаја на животну средину [13,17]. Аутомобилска индустрија предњачи у декарбонизацији кроз електрификацију и примену циркуларних модела производње [14,15]. Литература указује да је транспарентност ESG извештавања снажно повезана са регулаторним окружењем и институционалним притисцима [16].

3. МЕТОДОЛОГИЈА

Истраживање комбинује:

1. Секундарну анализу ESG извештаја (2023-2024);
2. Квантитативну анализу еколошки кључних индикатора перформанси;
3. „Scorecard" процену нивоа транспарентности.

У раду су коришћени индикатори који се прате у току целе године у компанијама и они обухватају:

- емисије из Опсега 1+2 (tCO_2e),
- потрошњу енергије (MWh/MJ),
- потрошњу воде (m^3),
- управљање отпадом (t, %, рециклажа).

Ови индикатори су у складу са међународним оквирима извештавања као што су Глобални оквир за добровољно извештавање о одрживости (енг. *Global Reporting Initiative*), ESRS стандарди и GHG (енг. *Greenhouse Gases*) протокол (Протокол о гасовима са ефектом стаклене баште) [3].

„*Scorecard*" модел процењује примену међународних ESG оквира, екстерну верификацију, постојање квантификованих циљева и јасно дефинисане KPI показатеље са базном (почетном) годином. Овакав приступ омогућава јединствену процену перформанси и квалитета извештавања [8].

3.1. „*Scorecard*" модел за процену нивоа транспарентности ESG извештавања

Ради квалитативне процене нивоа транспарентности ESG извештавања примењен је тзв. „scorecard" модел заснован на четири критеријума: примена међународног ESG оквира, постојање екстерне верификације, јасно дефинисани циљеви и доследно приказани KPI са базном годином [6,10]. Сваки критеријум носи максимално 1 поен (0-1), а збир се нормализује на скалу 0-5.

Табела 2. Просечна ESG „*scorecard*" оцена по секторима

Сектор	Просечна ESG оцена (0-5)	Ниво транспарентности
Аутомобилска индустрија	4,63	Веома висок
Фармацеутска индустрија	4,28	Висок
Прехрамбена индустрија	4,27	Висок
Грађевинска индустрија	3,95	Умерен
Компаније које послују на територији Србије	2,83	Низак

Резултати указују да сектори са снажним међународним регулаторним оквиром остварују највиши ниво ESG транспарентности, што је у складу са налазима о институционалном притиску и регулаторној хармонизацији [3,8]. Цементно-грађевински сектор показује нешто нижи скор, што је повезано са већом хетерогеношћу глобалних тржишта и различитим регулаторним механизмима. Најнижи просечни скор бележе компаније које послују на територији Србије, што потврђује да ESG зрелост у земљама у развоју зависи од степена интеграције у ЕУ регулаторни оквир, страног власништва и институционалног окружења [16].

4. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

4.1. Стуб животне средине (Истраживачко питање 1, ИП1)

Анализа показује да већина међународних компанија објављује емисије из Опсега 1 и Опсега 2, док је објављивање података из Опсега 3 значајно ређе. Овај налаз потврђује да индиректне емисије остају методолошки изазов [9]. Секторска анализа показује да цементна и аутомобилска индустрија имају највише апсолутне емисије, али и најчешће постављене нет-зеро циљеве [12,14]. То указује да репутациони и регулаторни притисци подстичу интензивнију

интеграцију ESG принципа у високоемисионим секторима.
Код управљања енергијом и водом примећује се већа транспарентност код мултинационалних компанија, док домаће компаније често објављују парцијалне податке без јасно дефинисане базне године. Управљање отпадом показује јасну корелацију између високог ESG скора и постојања квантификованих циљева [5].
Одговор на ИП1: ESG извештавање доприноси систематичнијем праћењу и управљању еколошким перформансама, али само по себи не гарантује директно смањење емисија.
Индустрије које су традиционално повезане са високим емисијама, као што су цементна и аутомобилска индустрија, показују веће варијације у праксама ESG извештавања [18,19]. Док поједине компаније у овим секторима развијају напредне системе извештавања о одрживости, друге и даље показују ограничену транспарентност у објављивању еколошких перформанси.

4.2. Механизми транспарентности (Истраживачко питање 2, ИП2)

Анализа ESG извештаја указује да кредибилитет објављених података не зависи искључиво од обима објављивања, већ пре свега од институционалних механизама који обезбеђују доследност, мерљивост и проверљивост информација.
Идентификована су четири кључна механизма транспарентности:
1. Стандардизација извештавања
Примена међународних оквира (GRI) и регулаторних стандарда ЕУ (CSRD/ESRS) уводи обавезне метрике, дефинисане јединице мере (tCO_2e, MWh, m^3) и обавезно раздвајање емисија по Опсегу 1, 2 и 3..
2. Екстерна верификација
Компаније које примењују екстерну верификацију (најчешће према ISAE 3000 стандарду) подвргавају ESG податке независној процени ревизорских кућа. Емпиријска литература показује да присуство независне верификације повећава поузданост података и смањује вероватноћу „greenwashing“-а [10,11].
3. Квантификовани циљеви (нет-зеро)
Постављање нумерички дефинисаних циљева (нпр. 30% редукције до 2030. године) са јасно наведеном базном годином омогућава дугорочно праћење перформанси. Без базне године, проценат смањења губи аналитичку вредност и отежава проверу реалног напретка.
4. Доследно праћење KPI индикатора
Транспарентност захтева континуитет у објављивању истих индикатора кроз више година. Промена методологије или селективно изостављање података отежава процену стварног тренда.
Одговор на ИП2: Кредибилитет ESG извештавања произлази из институционалне утемељености извештавања. Стандардизација (CSRD/ESRS) и екстерна верификација представљају кључне механизме који трансформишу ESG из добровољне комуникационе праксе у регулаторно структурисани систем одговорности. Поред разлика између појединачних компанија, анализа указује на изражене секторске обрасце у транспарентности ESG извештавања.

4.3. Међународне и домаће компаније (Истраживачко питање 3, ИП3)

Компаративна анализа показује јасну разлику у нивоу ESG зрелости између међународних и домаћих компанија. Међународне компаније систематски објављују емисије из Опсега 1 и 2, а све чешће и емисије из Опсега 3. Оне постављају нет-зеро циљеве са јасним временским оквиром, наводе базну годину и методологију нумеричког дела извештаја, имају екстерну верификацију ESG извештаја и примењују GRI, ESRS или CSRD стандарде.
Домаће компаније су фокусиране претежно на емисије из Опсега 1 и 2, док подаци из Опсега 3 често нису квантификовани. Екстерна верификација је ређа, а ESG извештавање је често наративног карактера.
Емпиријски налази указују да ниво ESG транспарентности у земљама у развоју зависи од страног власништва, степена интеграције у ЕУ регулаторни оквир и институционалне инфраструктуре [16].
Одговор на ИП3: Регулаторни оквир ЕУ и изложеност међународном тржишту капитала значајно утичу на виши ниво ESG транспарентности код међународних компанија.

4.4. Импликације за истраживања и јавне политике

Резултати овог истраживања имају значајне импликације како за будућа академска истраживања, тако и за развој јавних политика у области одрживости. Са истраживачког аспекта, добијени налази указују на потребу да се анализе ESG перформанси све више усмеравају на појединачне еколошке индикаторе, уместо искључиво на агрегиране ESG скорове. Будућа истраживања требало би да се фокусирају на развој секторски специфичних ESG метрика, као и на унапређење методологија за квантификацију индиректних емисија, посебно Опсега 3 емисија.
Са становишта јавних политика, резултати наглашавају значај развоја снажнијих регулаторних оквира и хармонизованих стандарда извештавања како би се повећала упоредивост и кредибилитет ESG информација. Јачање система независне верификације ESG података и проширење обавезе извештавања могу имати кључну улогу у унапређењу квалитета објављених информација и подршци доношењу информисаних одлука од стране инвеститора, регулатора и других заинтересованих страна.

5. ЗАКЉУЧАК

Истраживање потврђује да развијен ESG систем заснован на међународним стандардима, екстерној верификацији и јасно дефинисаним KPI индикаторима повећава вероватноћу унапређења еколошких перформанси. Међутим, ESG извештавање само по себи не гарантује директно смањење емисија. Оно представља управљачки инструмент који повећава транспарентност, смањује информациону асиметрију,

подстиче дугорочно планирање и уводи репутациони и регулаторни притисак.
Резултати указују на потребу за даљом стандардизацијом методологије извештавања за Опсег 3, преласком са ограниченог на виши ниво ревизорског уверења, јачањем институционалне подршке домаћим компанијама и развојем јединствених европских база ESG података. Допринос овог истраживања се огледа у интеграцији квантитативне анализе еколошких индикатора и квалитативне процене транспарентности ESG извештавања, чиме се омогућава свеобухватно разумевање односа између ESG пракси и стварних еколошких перформанси компанија.

6. ЛИТЕРАТУРА

[1] U.N. Global Compact, "Who Cares Wins", United Nations Department of Public Information, 2004.

[2] D. Tschopp, R. Huefner, "Comparing the evolution of CSR reporting to that of financial reporting", *J. Bus. Ethics*, Vol. 127, pp. 565–577, 2015.

[3] European Commission, "Circular economy action plan", Brussels, 2015. https://ec.europa.eu/ (приступљено у октобру 2025.)

[4] G. T. Garvey, M. Iyer, and J. Nash, "Carbon footprint and productivity: Does the 'E' in ESG capture efficiency as well as environment?", *J. Invest. Manag.*, Vol. 16, pp. 59–69, 2018.

[5] A. Baratta, A. Cimino, F. Longo, V. Solina, S. Verteramo, "The impact of ESG practices in industry with a focus on carbon emissions: Insights and future perspectives", *Sustainability*, Vol. 15, 2023.

[6] R.M.A. Zahid, M.K. Khan, W. Anwar, A. Naeem, "The role of audit quality in the ESG–corporate financial performance nexus: Empirical evidence from Western European companies", *Borsa Istanb. Rev.*, Vol. 22, No. 4, pp. 760–774, 2022.

[7] A. Clément, É. Robinot, L. Trespeuch, "Improving ESG scores with sustainability concepts", *Sustainability*, Vol. 14, 2022.

[8] M. Goldklang, B. Zhao, B. Bowring, U. Ruthbah, T. Le, "The impact of climate change and carbon policy on company earnings", *SSRN Electron. J.*, 2023. https://ssrn.com/ (приступљено у октобру 2025.)

[9] X. Bao, M. Sadiq, W. Tye, and J. Zhang, "The impact of environmental, social, and governance (ESG) rating disparities on corporate risk: The mediating role of financing constraints", *J. Environ. Manage*., Vol. 371, p. 123113, 2024.

[10] L. Liu, Y. Wang, C. Wu, "External corporate governance and assurance of corporate social responsibility reports: Evidence from China", *Sustain. Account. Manag. Policy J.*, Vol. 14, pp. 420–457, 2023.

[11] E.P.-Y. Yu, B.V. Luu, C.H. Chen, "Greenwashing in environmental, social and governance disclosures", *Res. Int. Bus. Finance*, Vol. 52, pp. 101192, 2020.

[12] Holcim Group, "Climate Report 2024", 2024. https://www.holcim.com (приступљено у новембру 2025.)

[13] S. Heinonen, "*Analyzing Sustainability in the Pharmaceutical Industry*", University of Turku Press, 2022.

[14] Tesla Inc., "Impact Report 2023", 2023. https://www.tesla.com/ (приступљено у новембру 2025.)

[15] Ford Motor Company, "ESG Review 2024", 2024. https://www.ford.com/ (приступљено у септембру 2025.)

[16] Z. Zheng, "The impact of ESG report transparency on investor behavior", *Adv. Econ. Manag. Political Sci.*, Vol. 129, pp. 151–156, 2024.

[17] D. Tipurić, E. Vlačić, I. Radak, A. Vučković, "Implementing ESG principles in pharma industry in emerging markets", *Econ. Enterp.*, Vol. 72, pp. 347–436, 2024.

[18] CEMEX, S.A.B. de C.V., "Integrated report 2024", 2024. https://www.cemex.com/ (приступљено у октобру 2025.)

[19] Mercedes-Benz Group AG, "Annual report 2024 (including sustainability statement)", Mercedes-Benz Group AG, 2024. https://group.mercedes-benz.com/ (приступљено у септембру 2025.)

Кратка биографија:



Татјана Рељин је рођена у Кикинди 1998. године. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Инжењерства заштите животне средине одбранила је 2026. године.
Контакт: tatjanareljin@outlook.com

Издвојени научни чланци

Selected Research Articles

Proceedings of the Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad

Original Research Article
UDK: 621.31
DOI: https://doi.org/10.24867/36WS012610

Validation of the Geometric Method for Large-Signal Stability Analysis of Two Parallel Grid-Following Converters

Carles Jiskoot Busquets[1], Giuseppe Urbano Tortorici[2], Guoqing Gao[1], Frede Blaabjerg[1]

[1] Aalborg University, Aalborg, Denmark, [2] University of Bologna, Bologna, Italy,
[1]cjisko23@student.aau.dk, [2]giuseppeurbanotortorici@gmail.com

Abstract –*The increasing penetration of inverter-based resources (IBRs) is fundamentally changing the power system dynamics, resulting in weaker-grid conditions with reduced system inertia and more frequency fluctuations. These conditions also raise questions about the validity of classical stability analysis. In this paper, the large-signal stability of grid-interfaced power converters in a wind power system application is investigated, comparing the Time-Domain model with the analytical model.*

First, an average value model of a single grid following (GFL) converter is developed and implemented in a PLECS environment together with its control strategy. Second, the analytical model for the single GFL converter is presented based on the average value model. A transient stability analysis is then performed using the Geometric Method for the analytical model, which is then compared to Time-Domain simulations. The same procedure is subsequently applied to two GFL converters connected in parallel.

Results show good agreement between the analytical and Time-Domain models under strong-grid conditions. However, discrepancies between the GFL Time-Domain and the analytical models show the fault trajectories advancing at different speeds. The differences are caused by the reduced order of the analytical model, which does not capture the dynamics represented in the Time-Domain model.

Overall, the Geometric Method provides a good approximation of the system behaviour, particularly under strong-grid conditions, although discrepancies with the Time-Domain model become more pronounced as the grid strength decreases. This trend is observed for both the second-order single GFL converter and the two parallel GFL converters.

Keywords: Large-Signal Stability, Grid Following, Multiple Converter Wind Power System, Protections, Time-Domain Simulation, Analytical Model.

1. INTRODUCTION

Renewable energy sources (RES) start to account for larger shares of electrical production, forcing the displacement of conventional power plants. This change has a direct impact on the stability dynamics of the power system, which has traditionally relied on large power plants generating power through synchronous generators (SGs). SGs contribute to grid stability through the kinetic energy stored in their rotating masses, which opposes sudden power imbalances during fault conditions.

This physical inertia is not present in inverter-based resources (IBRs), weakening the grid stability as the ratio of electricity generation shifts toward RES. Moreover, most RES are inherently variable over time. Therefore, the stability of IBR dominated power systems becomes reliant on the interaction of converter control structures during severe grid disturbances such as short circuit faults and voltage sags.

Large-signal disturbances are common in power systems; consequently, it is necessary to investigate whether a converter can recover stability after a grid fault [1]. Moreover, national grid codes require grid-connected converters to provide Low Voltage Ride Through (LVRT) capability. Besides Time-Domain simulation, the stability of converters can be analysed through their dynamic model by using approaches such as the Geometric Method or the Lyapunov method [2]. The Equal Area Criterion, which is a common analysis method for transient stability in SGs, is not often used in converters because it does not consider damping; therefore, it can only be used in systems where damping is positive.

The increased introduction of IBRs into the electrical grid is partially explained by the rapid adoption of solar

power and wind turbines (WT). WTs transform the mechanical power of the wind into electricity. One of the most common topologies is the Type 4 WT shown in Figure 1 where the transformation is done through a generator connected to the grid through a back-to-back converter [3]. One of the advantages of this approach is the decoupling between the grid and the generator: there is an AC/DC conversion (generator side converter) and a DC/AC conversion (grid side converter) [4]. Depending on how the synchronisation with the grid is done, the grid interfacing converter can be either a Grid Following (GFL) or Grid Forming (GFM) converter. GFL converters, which are within the scope of this work, control the output AC current by synchronising it with the grid [4]. The synchronisation is usually done with a PLL, which includes a PI controller [5].

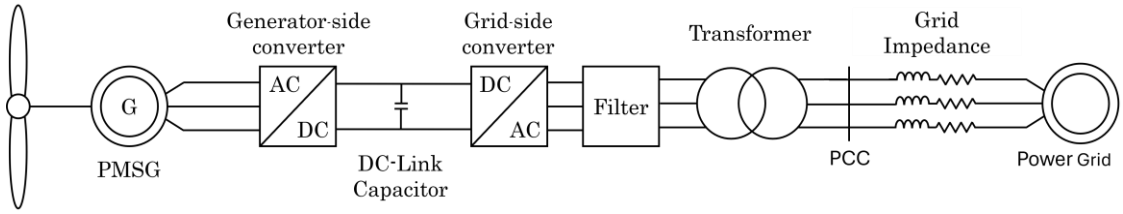


Figure 1. Schematic of a Type 4 wind turbine and its connection to the grid.

Transient stability analysis of power converters is widely studied in the literature. Reference [1] investigates the effects of a weak grid on the stability of a GFL converter, focusing on the PI parameters of the PLL. Reference [6] compares GFL and GFM controls analysing the system parameters, providing a damping coefficient criterion to determine whether a converter is suitable for a strong or weak grid. Reference [2] performs a comparative analysis of GFL and GFM converters for a 10 kW application based on the Geometric Method, the Lyapunov method, and Time-Domain simulations. Although comparative studies, such as in [2], have been conducted, it is not clear to what extent the analytical methods are reliable compared to Time-Domain simulations. Moreover, the literature is based on low power and voltage applications.

The purpose of this paper is to investigate the transient stability of both a single GFL converter and two parallel GFL converters in a WT application. The data is based on a string of the Anholt offshore wind farm [7]. In order to simplify the complexity of the analysed system, an aggregated model of the wind turbines connected to the same string is considered. It is possible to aggregate single wind turbine's converters belonging to the same power plant to study low-frequency dynamics, such as synchronisation controls or fault-ride through controls [7], [8]. This is justified because: 1) wind turbines within a farm usually employ very similar control strategies with closely matched parameters; 2) the internal electrical network of a wind farm is typically strong, which leads to very small voltage and angle differences among the individual units. Furthermore, the project focuses on the grid-side converter. Because the time scales of the current controller and PWM switching are significantly faster than those associated with the transient-stability phenomena, the current control and switching behaviour is neglected and the output of the converter is an ideal current source.

The content of the paper is as follows. Section 2 presents the structure, Time-Domain models, and analytical models of the single GFL converter and the two parallel GFL converters system. Section 3 introduces the Geometric Method and describes its application to the two analysed systems. Section 4 presents the simulation setup and compares the Geometric Method with the Time-Domain simulations for both configurations. Finally, Section 5 summarises the main findings and outlines directions for future research.

2. GRID INTERFACING CONVERTERS

2.1 Single GFL Converter

2.1.1 Time-Domain Model

GFL converter control synchronises its internal reference frame with that of the grid voltage: this is achieved with the phase-locked loop (PLL). A schematic of a GFL converter with PLL synchronisation can be seen in Figure 2. A PLL is a feedback control system that generates a reference signal which tracks the phase of an input signal. The Synchronous Reference Frame PLL (SRF-PLL) is the most used, due to its simplicity and performance under balanced grid conditions. The input is the measured voltage at the point of common coupling (PCC): the three-phase voltage V_c, which is first transformed into the rotating dq-frame. The PLL is then modelled as a PI controller and an integrator, as seen in Figure 2. The output of the PLL is then the estimated grid angle θ_{pll} and its

corresponding frequency ω_{pll}.

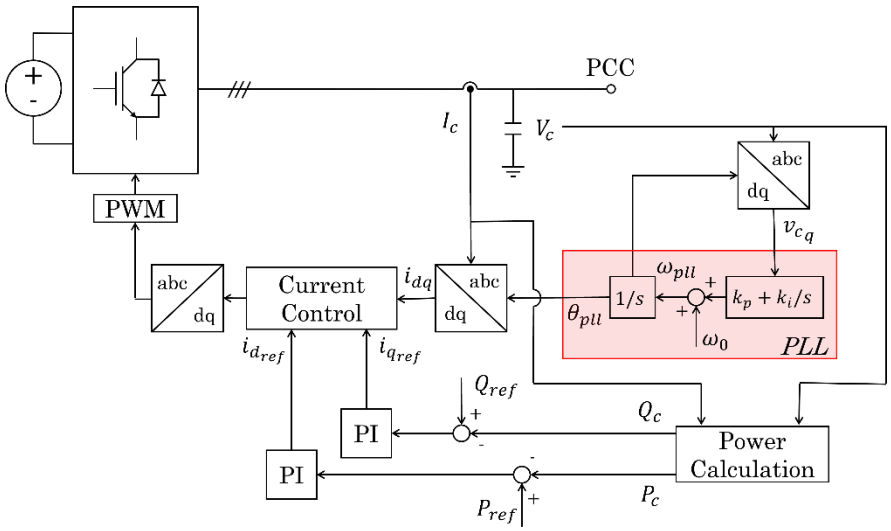


Figure 2. GFL converter with the PLL synchronisation control highlighted in the red box. The measured grid voltage at PCC is shown as Vc.

The Time-Domain model of the single GFL includes the PLL to determine θ_{pll} and ω_{pll}. However, the outer control loops are neglected because the time scale is different than the studied large-signal phenomena. Consequently, the GFL is simplified to an ideal current source, where the phase is determined by the PLL. During normal operation, the converter is set to inject d-component current. The Time-Domain model is implemented in PLECS. Notice that the wind turbine model shown in Figure 1 includes a filter and a transformer to interface with the grid. In this paper filtering is not considered, since prior work has shown that filter capacitor dynamics can be neglected without a significant loss of accuracy in large-signal models [9], and transformer impedance is aggregated with grid impedance.

2.1.2 Analytical Model

The analytical model is based on the PLL shown in Figure 2. The dynamics of the PLL depends on the q-axis component of the transformed Vc [1]. V_{c_q}, the q-axis component, is defined as:

$$V_{c_q} = R_g \cdot I_{c_q} + X_g \cdot I_{c_d} + \frac{X_g \cdot I_{c_d}}{\omega_0}\omega_p + V_g \cdot sin(\theta_g - \theta_{pll}) \quad (1)$$

From (1), the dynamic model of the PLL can be defined as a second-order differential equation (2) [2].

$$\frac{k_1}{k_i}\ddot{\delta} + k_2\dot{\delta} + V_g sin(\delta) = R_g \cdot I_{c_q} + X_g \cdot I_{c_d} \quad (2)$$

Where δ is defined in (3). k_1 and k_2 can be found in (4) and (5). k_1/k_i represents the equivalent inertia, and k_2 is the damping.

$$\delta = \theta_{pll} - \theta_g \quad (3)$$

$$\mathrm{k_1} = 1 - \frac{k_p \cdot X_g \cdot I_{c_d}}{\omega_0} \quad (4)$$

$$\mathrm{k_2} = \frac{\mathrm{k_p}}{\mathrm{k_i}} \cdot V_g \cdot \cos(\delta) - \frac{X_g \cdot I_{c_d}}{\omega_0} \quad (5)$$

2.2 Analytical Model of Two Parallel GFL Converters

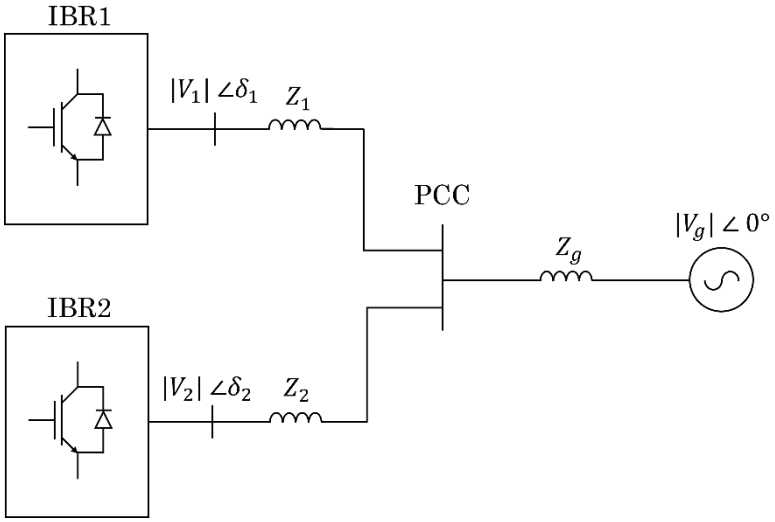


Figure 3. Two converters connected to the grid. It includes the impedance between the converters and the PCC (Z_1 and Z_2) and the grid impedance Z_g.

Considering the PLL dynamic model shown in Figure 3, the output of the PI control can be modelled as:

$$\omega_p = \dot{\delta} = k_p \cdot V_{cq} + k_i \cdot \int V_{cq}\, dt \tag{6}$$

With two GFL in parallel as shown in Figure 3, one must consider the dynamics of both inverters to derive the analytical model of the system, shown in (7).

$$\begin{cases} \dot{\delta}_1 = k_{p1} \cdot V_{cq1} + k_{i1} \cdot \xi_1 \\ \dot{\xi}_1 = V_{cq1} \\ \dot{\delta}_2 = k_{p2} \cdot V_{cq2} + k_{i2} \cdot \xi_2 \\ \dot{\xi}_2 = V_{cq2} \end{cases} \tag{7}$$

The output quadrature voltage component of each IBR V_{cqi} can be derived from Figure 3 using Kirchhoff's voltage law and considering $X_{1sum} = X_1 + X_g$ and $X_{2sum} = X_2 + X_g$:

$$\begin{cases} V_{cq1} & = X_{1sum} I_{cd1} + X_g I_{cd2} \cos(\delta_2 - \delta_1) - V_g \sin \delta_1 \\ V_{cq2} & = X_{2sum} I_{cd2} + X_g I_{cd1} \cos(\delta_1 - \delta_2) - V_g \sin \delta_2 \end{cases} \tag{8}$$

3. TRANSIENT STABILITY ANALYSIS – GEOMETRIC METHOD

3.1 Single GFL Converter

The Geometric Method is a transient stability assessment method applicable to power converters. It determines stability boundaries through the stable and unstable manifolds of saddle equilibria. Applied to power converters, this consists of finding the manifolds of unstable equilibrium points (UEPs), which determine whether post-fault states remain stable or diverge [10]. The stability zone determined by the manifolds is called Basin of Attraction (BOA).

The stable equilibrium point (SEP) defines the power angle δ and angular frequency ω during normal

operation. This can be found considering steady-state conditions of the dynamic model (2), as shown in (9).

$$\delta = \mathrm{asin}\left(\frac{\mathrm{X_g} \cdot \mathrm{I}_{c_\mathrm{d}}}{\mathrm{V_g}}\right) \tag{9}$$

Because of the periodicity of the sine function, the SEPs can be defined to be $(\delta + 2\pi k, \omega_0)$, where k is an integer and ω_0 is the fundamental angular frequency. Similarly, the UEPs can be found from the SEPs to be $((1 + 2k)\pi - \delta, \omega_0)$. To determine the BOAs, the manifolds are found by reverse-time integration from the UEPs. This is performed by using the ODE45 function in MATLAB.

Figure 4 shows an example of BOA and fault trajectory obtained using the Geometric Method. SEP 1 is the SEP during normal operation, where the power angle is close to 0 rad and the angular frequency 100π rad/s. When a severe grid fault occurs, the angular frequency and power angle increase: it is shown as the red trajectory in Figure 4. The converter can recover stability depending on the fault clearance time: if the fault trajectory ends within the BOA, it will recover its stability (green trajectories); if not, it will lose synchronism (black trajectory). Notice that the converter will recover stability if the fault trajectory ends within the BOA of another SEP (e.g. SEP2, corresponding to an equivalent periodic equilibrium).

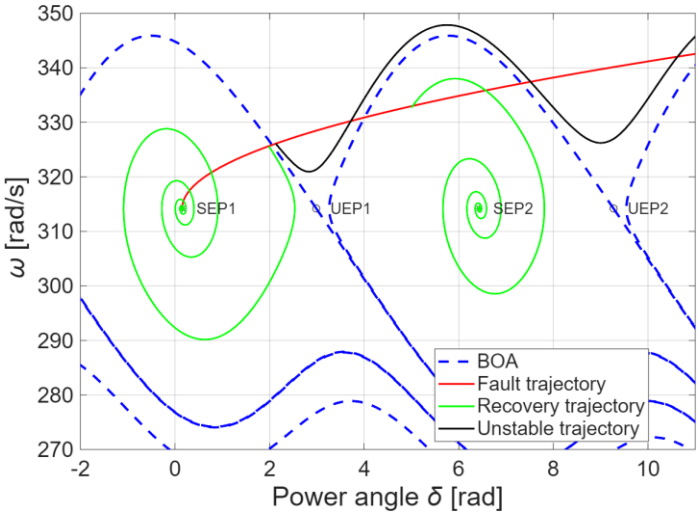


Figure 4. Trajectories for different fault clearance times (green and black) after a severe grid fault (red), where the BOA of two SEPs is found from the UEPs with reverse-time integration (blue-dashed trajectories).

3.2 Two Parallel GFL Converters

For the two-converter system, the Geometric Method is extended to the coupled nonlinear dynamics introduced in Section 2.2. The first step is to determine the equilibrium points (EPs) of the system by imposing zero time derivatives in (7). By substituting the expressions of the quadrature voltage components in (8), the equilibrium conditions are obtained as:

$$\begin{cases} V_{cq1} &= X_{1sum} I_{cd1} + X_g I_{cd2}\, cos(\delta_2 - \delta_1) - V_g\, sin\, \delta_1 \;=\; 0 \\ V_{cq2} &= X_{2sum} I_{cd2} + X_g I_{cd1}\, cos(\delta_1 - \delta_2) - V_g\, sin\, \delta_2 \;=\; 0 \end{cases} \tag{10}$$

Because of the sine and cosine nonlinearities in (10), multiple EPs may exist and are determined using a grid-based search strategy. Once the phase-plane is divided into a mesh, EPs can be found by solving (10) with a non-linear solver (for example, fsolve in MATLAB), applied multiple times starting from the different points of the defined grid.

Once the EPs are found, they need to be classified as SEPs and UEPs. To do this, the Jacobian matrix of the system is evaluated at each EP, and its eigenvalues are computed. The sign of the real parts of these eigenvalues reveals the type of EP:

- SEP: All eigenvalues have negative real parts.
- Saddle Point (UEP): One eigenvalue has a positive real part, the rest are negative. The system is unstable in one direction but stable in all others. Saddle points lie on the boundary between stable and unstable regions.
- Unstable Node (UEP): All eigenvalues have positive real parts. The system moves away from this point in every direction, it is fully unstable.

The BOA can later be found by applying reverse-time integration starting from the Saddle Points.

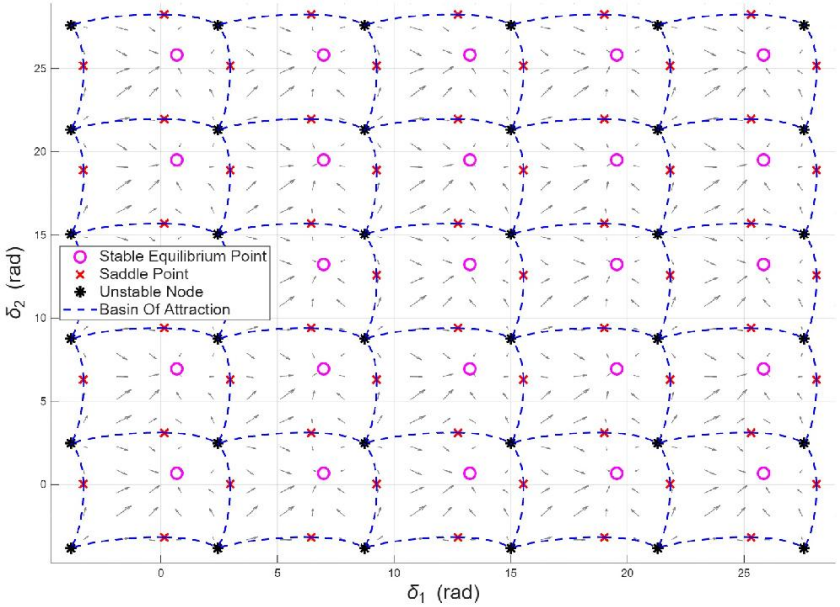


Figure 5. BOA and Equilibrium Points of the two parallel GFL converters system.

4. SIMULATION RESULTS

The case study is based on the 400 MW Anholt wind farm [11]. A whole string of 9 turbines, each rated at 3.6 MW (32.4 MW in total) and connected to a medium-voltage grid of 33 kV, is considered as a single grid-interfaced converter (Table 1). The transient stability of the system is assessed under three different grid impedances, and the corresponding per-unit values are reported in Table 2. Each simulation considers a grid fault lasting t_{fault} = 150 ms, as 150 ms represents a commonly adopted fault-ride-through time scale in several European grid codes.

4.1 Single GFL Converter Results

The parameters used in the PLL for the single GFL converter are presented in Table 3. These values make the system underdamped. The results of the simulations can be seen in Figure 6, Figure 7, and Figure 8. In these, the fault trajectories are shown in red, the recovery trajectories are shown in green, and the BOA boundaries are shown as blue dashed lines. To distinguish the two methods, the Time-Domain (TD in the legend) simulation results are presented as a solid line, and for the Geometric Method (GM in the legend) as a dashed line.

Table 1. Simulation parameters.

Symbol	Quantity	Value	Unit
P	Rated power	32.4	MW
V_g	Grid line-to-line RMS voltage	33	kV
V_{sag}	Line-to-line RMS voltage during the fault	0.3	kV
ω_s	Base Angular Frequency	100×π	rad/s
t	Fault duration	150	ms

Table 2. Grid-strength scenarios and corresponding equivalent grid impedances.

Strength	Value in p.u.
Strong	0.1
Medium	0.3
Weak	0.5

Table 3. PLL parameters of the single GFL converter.

Symbol	Quantity	Value	Unit
k_p	Proportional gain of the PI controller	48	-
k_i	Integral gain of the PI controller	1058	-

For each scenario, two different plots can be found. On the left, the fault trajectory for the Geometric Method starts at the SEP, and the recovery trajectory starts where the fault trajectory stops. On the right plot, the Geometric Method is performed considering the jump in ω that occurs when a fault occurs or is cleared. In Figure 6 (right), the initial points used in the Geometric Method are indicated with the red (fault) and green (recovery) arrows. To consider these jumps, the results of the Time-Domain simulation are required.

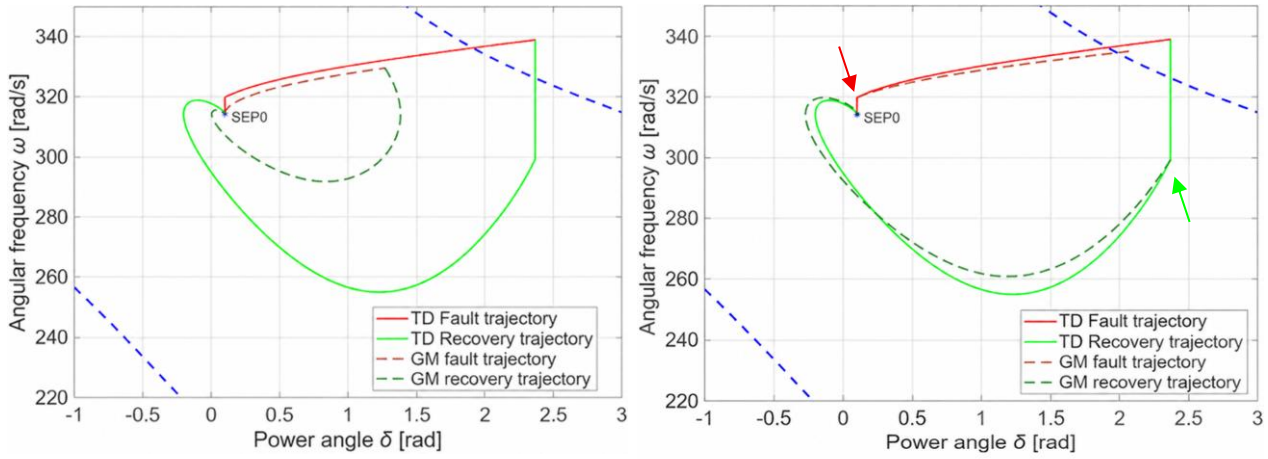


Figure 6. Trajectories for the Time-Domain simulations (TD) and Geometric Method (GM) for the GFL converter in the strong grid strength scenario for a fault duration of 150 ms. On the left, the GM is performed from SEP0; on the right, the GM is performed from the initial condition obtained from the Time-Domain results.

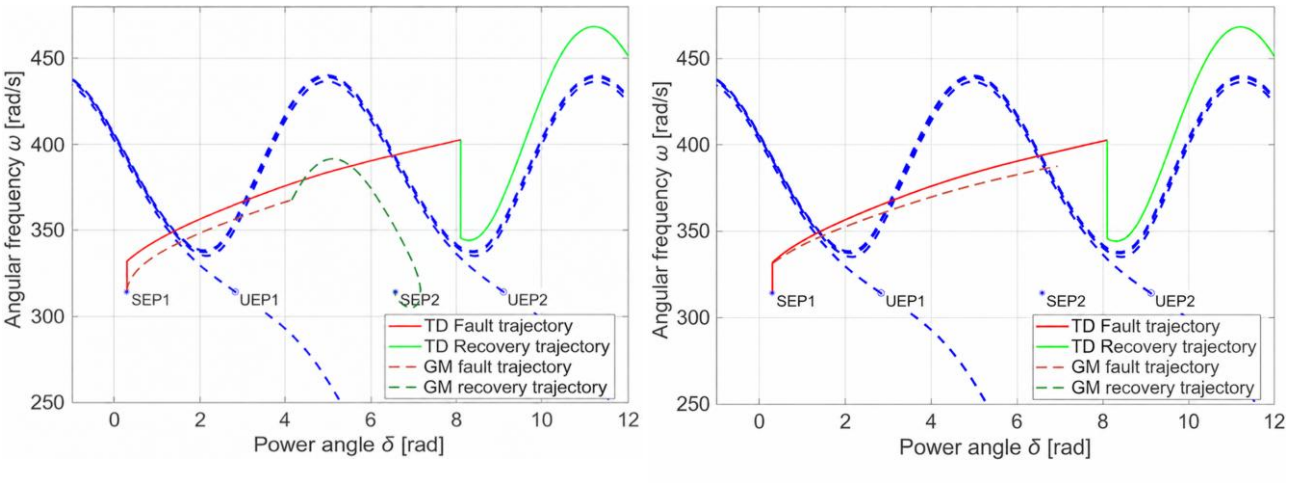


Figure 7. Trajectories for the Time-Domain simulations (TD) and Geometric Method (GM) for the GFL converter in the medium grid strength scenario for a fault duration of 150 ms. On the left, the GM is performed from SEP0; on the right, the GM is performed from the initial condition obtained from the Time-Domain results.

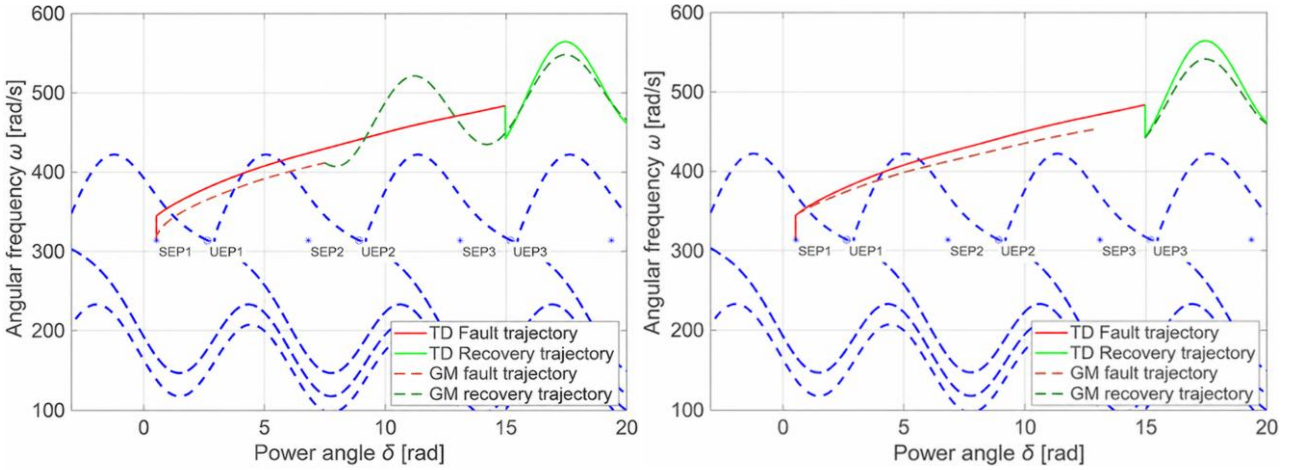


Figure 8. Trajectories for the Time-Domain simulations (TD) and Geometric Method (GM) for the GFL converter in the weak grid strength scenario for a fault duration of 150 ms. On the left, the GM is initialised at SEP0; on the right, the GM is performed from the initial condition obtained from the Time-Domain results.

The results show that the initial point of the fault and recovery trajectories has a significant influence on the GM. For example, in Figure 7 (left), the GM shows that the converter is able to recover stability when the fault is cleared, while the Time-Domain simulation results show that the converter loses synchronism. When the GM considers the jump in ω (right), the results converge with those of the Time-Domain simulation and the converter loses synchronism.

The fault trajectory predicted by the GM evolves more slowly than the corresponding time-domain trajectory. These differences between the two methods are due to the simplification of the analytical model compared to the Time-Domain. The analytical model is a second-order model, which does not take into account the fast electromagnetic dynamics associated with the grid inductive impedance. A higher order analytical model would reduce the differences.

The converter is shown to be able to regain stability after the fault in the strong grid scenario (Figure 6). However, Time-Domain simulations show that the converter cannot recover stability after the fault in weaker grid conditions, as seen in Figure 7 and Figure 8. The GFL converter is more stable in strong grid conditions.

A comparison was carried out to determine the difference in fault-trajectory times. Table 4 compares the Critical Clearing Time (CCT) obtained with the GM and the time-domain model. The CCT is defined as the maximum duration for which a fault can persist before the system loses synchronism. The CCT for both the Time-Domain and analytical models is obtained by iteration, adjusting the fault duration time until a value was found where the system would regain stability.

Table 4. Comparison of analytical and Time-Domain methods. The table shows the time for each method's fault-trajectory to reach the perimeter of the initial BOA, for each grid strength

Grid strength	CCT (GM)	CCT (TD)	Δt
Strong	0.192 s	0.164 s	0.028 s
Medium	0.0845 s	0.066 s	0.0185 s
Weak	0.0500 s	0.036 s	0.0140 s

4.2 Multiple GFL

To validate the results obtained by the GM, a Time-Domain simulation of the system depicted in Figure 3 is carried out. Two models of the single GFL converter are connected in parallel and analysed under the same grid fault condition of the previous section. The PI controller of the two IBRs is designed to be overdamped. Table 5 and Table 6 present the parameters used in Geometric Method and Time-Domain simulations.

The results of the simulations can be seen in Figure 9, Figure 10, and Figure 11. The fault trajectory of the Time-Domain simulation is shown in solid red while the one that is obtained by the analytical model in dashed black. The recovery trajectories are shown in solid green for the Time-Domain solution and in dashed orange for the GM. To distinguish the two methods, the Time-Domain (TD in the legend) simulation results are presented as a solid line, and for the Geometric Method (GM in the legend) as a dashed line.

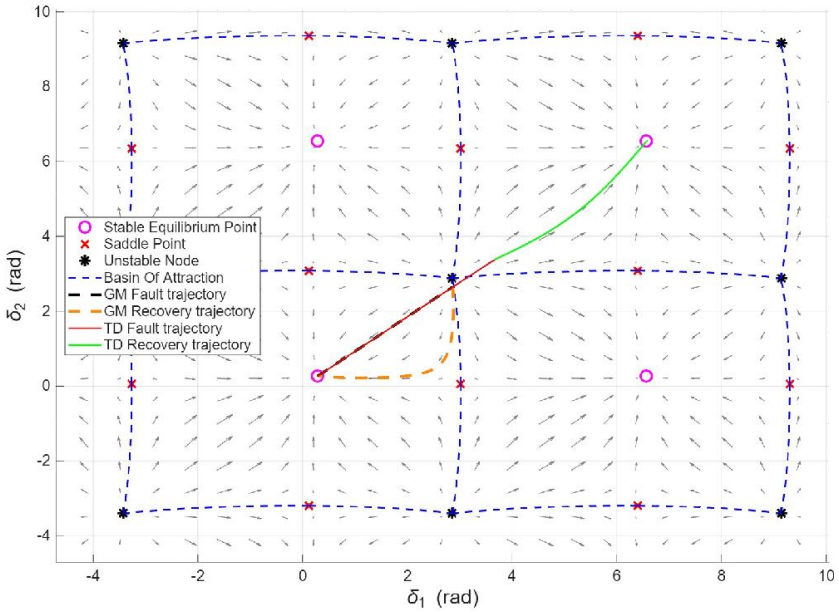


Figure 9. Fault trajectories of Time-Domain and Geometric Method simulation with strong grid. Fault duration set to t_{fault} = 150 ms.

Figure 9 presents the simulation results of the two parallel GFL inverters operating in a strong grid subject to a fault duration of t_{fault} = 150 ms. Prior to the fault inception, both the GM and TD trajectories start from an identical steady-state equilibrium point. When the fault occurs, the two models follow the same path. However, after fault clearance GM simulation ends in SEP1, while the Time-Domain simulation ends in SEP2 since the fault is cleared after its trajectory falls within the BOA of SEP2. Thus, Time-Domain and the Geometric Method predict different numbers of phase slips before resynchronisation in this case.

Furthermore, the post-fault recovery trajectory of the Time-Domain simulation follows the vector field of the BOA. The fault trajectory computed through the Geometric Method is slower than the Time-Domain simulation, as in the single converter configuration. Nevertheless, during the post-fault recovery phase, the Time-Domain trajectory closely follows the analytical vector field generated by the Geometric Method.

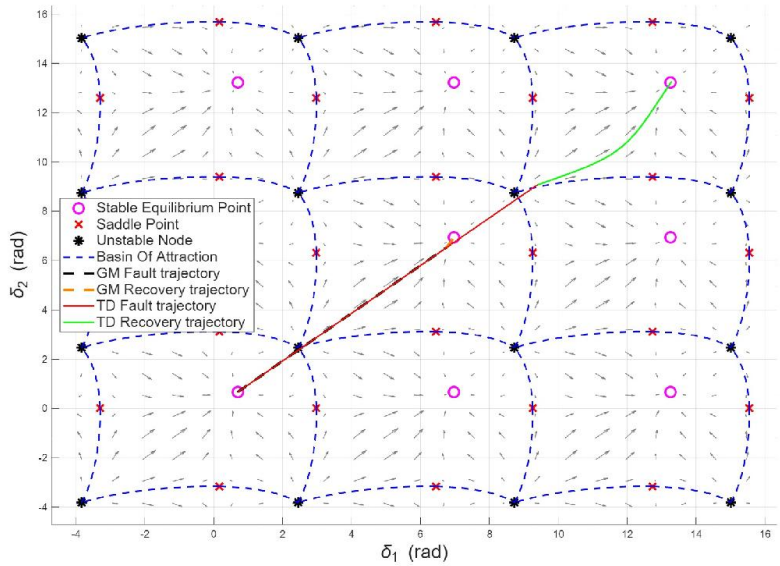


Figure 10. Fault trajectories of Time-Domain and Geometric Method simulation with medium strength grid. Fault duration set to t_{fault} = 150 ms.

The dynamic response of the system under a medium strength grid configuration subject to a fault duration of t_{fault} = 150 ms is depicted in Figure 10. Due to the increased grid impedance with respect to the strong grid scenario, the post-fault voltage degradation at the PCC is significantly more severe, thereby accelerating the phase angle divergence of both parallel converters. For the same fault duration, both GM and TD simulations start from the same equilibrium point, i.e. SEP1, but are cleared within different BOAs.

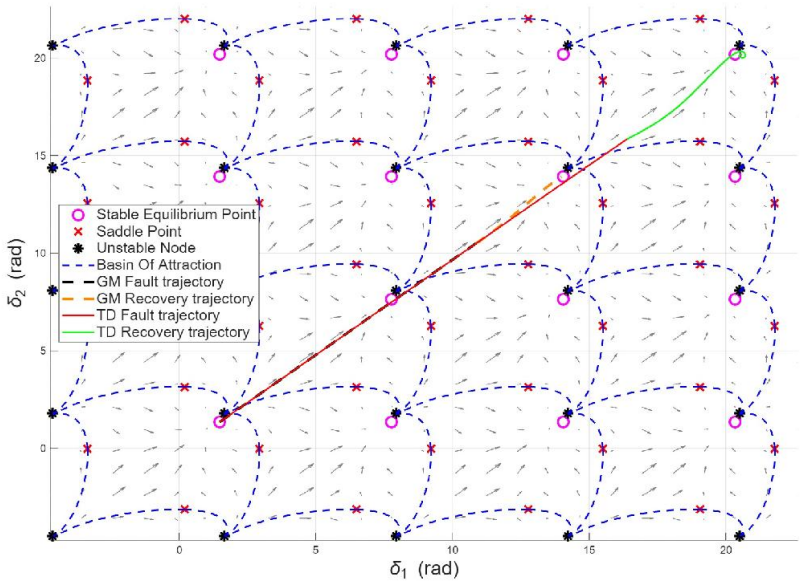


Figure 11. Fault trajectories of Time-Domain and Geometric Method simulation with weak grid. Fault duration set to t_{fault} = 150 ms.

Results show that the two GFL converter system does not experience standard out-of-step synchronism loss; instead, it successfully re-establishes stability across every grid strength scenario under the considered 150 ms fault duration. Figures 10 and 11 show that weaker grid strength results in a faster variation of the converter phase angles δ1 and δ2, thus longer trajectories that end up in more distant SEPs after the same clearing time.

As discussed for the single converter systems, the Geometric Method does not account for the electromagnetic transients of the grid inductance. This discrepancy becomes more pronounced as the grid becomes weaker. Furthermore, Figure 11 shows that higher values of the impedance affect the geometry of BOAs to an increasingly curved shape, while SEPs get closer to the Unstable Nodes.

Overall, despite the faster evolution of the fault trajectory observed in the Time-Domain simulations compared with the Geometric Method, the latter provides a good approximation of the two-converter system behaviour and provides a useful representation of the BOAs across the three analysed grid-strength scenarios, although with increasing temporal discrepancies as the grid becomes weaker.

Table 5. Characteristics of the two parallel GFL converters.

Symbol	Quantity	Value	Unit
k_{p1}	Proportional gain of the PI controller	10×2×π	-
k_{i1}	Integral gain of the PI controller	2×π	-
k_{p2}	Proportional gain of the PI controller	10×2×π	-
k_{i2}	Integral gain of the PI controller	2×π	-

Table 6. Simulation parameters for the two parallel GFL converters system.

Symbol	Quantity	Value	Unit
P	Rated power	32.4	MW
V_g	Grid line-to-line RMS voltage	33	kV
ω_s	Base Angular Frequency	100×π	rad/s
V_{sag}	Line-to-line RMS voltage during the fault	0.3	kV
I_{1d}	Current reference IBR1	1	p.u.
I_{2d}	Current reference IBR2	0.8	p.u.
Z_1	Inter-array line impedance of IBR1	0.1j	p.u.
Z_2	Inter-array line impedance of IBR2	0.1j	p.u.

5. CONCLUSION

This paper investigated the large-signal stability of a single GFL converter and two parallel GFL converters by comparing a reduced-order analytical model, analysed through the Geometric Method, with Time-Domain simulations. The results show that the Geometric Method provides a good approximation of the overall system behaviour, particularly under strong-grid conditions. However, the accuracy of the predicted fault trajectories decreases as the grid becomes weaker, mainly because the reduced-order analytical model does not capture the fast electromagnetic dynamics represented in the Time-Domain model.

For the single GFL converter, the Time-Domain fault trajectory evolves faster than that predicted by the Geometric Method. This difference is also reflected in the Critical Clearing Time, which is consistently overestimated by the analytical model.

Furthermore, the instantaneous jump in angular frequency occurring at fault inception and clearance is not inherently reproduced by the reduced-order model. When this jump is accounted for using the Time-Domain initial condition, the alignment between the two approaches improves significantly. This, however, introduces a dependence on the Time-Domain simulation and therefore limits the standalone applicability of the present analytical formulation.

For the two-converter system, the Geometric Method provides a useful representation of the BOAs and provides a representative approximation of the system trajectories for all three analysed grid-strength scenarios. Nevertheless, the Time-Domain trajectories evolve faster and may enter a different basin of attraction after fault clearance, leading to a different final stable equilibrium point. These discrepancies become more pronounced as

the grid impedance increases.

Overall, the Geometric Method is suitable for obtaining a qualitative and approximate assessment of large-signal stability and for identifying the stability regions of GFL converter systems. Its main limitation is the reduced temporal accuracy of the analytical model, particularly under weaker-grid conditions. Future work should therefore focus on improving the analytical formulation so that the fast transient effects and the frequency jump at fault inception and clearance can be represented directly, reducing the dependence on Time-Domain simulations and improving the accuracy of the stability assessment.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank Vera Risager Wittenfeldt Dalager for her valuable input on the single GFL converter analysis.

DECLARATIONS

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

Data availability: The original contributions presented in this study are included in the article. Further inquiries can be directed to the corresponding author(s).

Author contributions: Conceptualisation, G.G. and F.B.; investigation, C.J.B. and G.U.T.; writing—original draft preparation, C.J.B. and G.U.T.; writing—review and editing, C.J.B., G.U.T., G.G. and F.B.; supervision, G.G. and F.B. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

REFERENCES

[1] Q. Hu, L. Fu, F. Ma, and F. Ji, "Large signal synchronizing instability of PLL-based VSC connected to weak AC grid," IEEE Trans. Power Syst., pp. 1–1, 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2892224.

[2] G. Gao, L. Huang, M. K. Bakhshizadeh, and F. Blaabjerg, "A comparative large-signal stability analysis of grid-following and grid-forming converter," in 2025 IEEE Kiel PowerTech, Kiel, Germany, 2025, pp. 1–6, doi: 10.1109/PowerTech59965.2025.11180290.

[3] F. Blaabjerg, M. Chen, and L. Huang, "Power electronics in wind generation systems," Nature Reviews Electrical Engineering, pp. 234–259, 2024.

[4] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodríguez, Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems. John Wiley & Sons, 2010.

[5] H. Zhang, W. Xiang, W. Lin, and J. Wen, "Grid-forming converters in renewable energy sources dominated power grid: Control strategy, stability, application, and challenges," J. Mod. Power Syst. Clean Energy, vol. 9, pp. 1239–1256, 2021, doi: 10.35833/MPCE.2021.000257.

[6] X. Fu, J. Sun, M. Huang, Z. Tian, H. Yan, H. Iu, P. Hu, and X. Zha, "Large-signal stability of grid-forming and grid-following controls in voltage source converter: A comparative study," IEEE Trans. Power Electron., pp. 1–1, 2020, doi: 10.1109/TPEL.2020.3047480.

[7] M. G. Taul, X. Wang, P. Davari and F. Blaabjerg, "Reduced-Order and Aggregated Modeling of Large-Signal Synchronization Stability for Multiconverter Systems," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 9, no. 3, pp. 3150-3165, June 2021, doi: 10.1109/JESTPE.2020.3015293.

[8] M. Bakhshizadeh, M. Kazem, B. Vilmann, and Ł. Kocewiak, "Modal aggregation technique to check the accuracy of the model reduction of array cable systems in offshore wind farms," Energies, vol. 15, no. 21, 2022.

[9] Huang, L., Wu, C., Zhou, D., Blaabjerg, F., & He, S. (2024). Large-Signal Modeling of Grid-Following Inverter: from Sixth-Order Model to Second-Order Model. In 2024 IEEE 10th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2024-ECCE Asia) (pp. 3413-3420). IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). https://doi.org/10.1109/IPEMC-ECCEAsia60879.2024.10567659

[10] Gao, Guoqing & He, Shan & Blaabjerg, F.. (2026). Transient Stability Analysis and Protection of Power-Converter-Dominated Power Systems: A Review and Outlook. CSEE Journal of Power and Energy Systems. 10.17775/CSEEJPES.2025.06420.

[11] Ørsted: Anholt Offshore Wind Farm. Available online: https://orstedcdn.azureedge.net/-/media/www/docs/corp/com/our-business/wind-power/wind-farm-project-summary/anholt_uk_2018.ashx?la=en&rev=3b2f175b341e4ca2b906bf2a2ff68c8f&hash=51B4609E53A631D29E0EF49936C33A84

AUTHOR BIOGRAPHIES

Carles Jiskoot Busquets received the B.S. degree in energy engineering from Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain, in 2025. He is currently pursuing the M.S. degree in electrical engineering at Aalborg University, Aalborg, Denmark. His research interests include control and stability analysis of power converters.

Giuseppe Urbano Tortorici received the B.S. degree in Energy and Renewable Sources engineering from the University of Palermo, Palermo, Italy, in 2024. He is currently pursuing the M.S. degree in electrical engineering at the University of Bologna, Bologna, Italy. His research interests include control and stability analysis of power converters.

Guoqing Gao (Member, IEEE) received the B.S. degree from Xidian University, Xi'an, China, in 2017, the M.S. degree from Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, in 2020, and the Ph.D. degree from Aalborg University, Aalborg, Denmark in 2024, all in electrical engineering.
Since 2024, he has been with the Department of Energy Technology, Aalborg University, as a Post-Doctoral Researcher. He is currently a Carlsberg Internationalization Postdoctoral Fellow with Imperial College London, Oxford University, and Aalborg University.
He serves as a member of two IEEE Power & Energy Society (PES) Task Forces on Modelling and Dynamic Stability Impact of Grid Enhancing Technologies in Inverter-Based Resource Rich Systems and Cross-Sector Energy System Resilience Under Climate Change, and as a member of CIGRE JWG C4/A3.79 on Temporary Overvoltage Protection Technologies for High-Voltage Transmission Systems with Large-Scale Renewable Energy Bases. He is also a member of the CIGRE Denmark Next Generation Network (NGN) and was selected as the National Delegate representing Denmark at the CIGRE Paris Session 2026. His editorial service includes serving as an Editorial Board Member for npj Power Electronics, an Associate Editor for Open Journal of Power Electronics, a Topic Editor and Review Editor for the Smart Grid Section of Frontiers in Energy Research, an Early Career Editorial Board Member for the Power Electronics Section of Electronics and for Energies, a Young Editorial Board Member for Carbon Neutral Systems, and a Leading Editor for two Electronics Special Issues on Advancing Power System Intelligence: AI-Based Forecasting, Operation, and Control and Analysis, Modelling, and Control of Power Converters. He has been invited as a Tutorial Speaker for the 11th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA 2026), Singapore, and has delivered six invited technical talks to leading power and energy companies, including Ørsted, Hitachi Energy, Nanrui Group, and Energinet, on converter-dominated power systems, transient stability, grid-forming control, protection coordination, and HVDC-connected offshore wind farms. He has also given oral presentations at IEEE PowerTech 2025, ECCE Europe 2023, IEEE PEDG 2023, IEEE PEDG 2022, ECCE Asia 2019, and PEDG 2019. His conference service includes serving as a Publication Committee Member for IEEE PES ISGT Europe 2026 and as a Leading Special Session Chair for IEEE I&CPS Asia 2026, ISESC 2026, and EPREC 2027. He also serves as a reviewer for several leading journals, including IEEE Transactions on Power Electronics, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, IEEE Transactions on Power Delivery, IEEE Transactions on Energy Conversion, and IEEE Transactions on Industrial Informatics. His research interests include the control, protection, and stability analysis of power-electronic-converter-dominated power systems.

Frede Blaabjerg was with ABB-Scandia, Randers, Denmark, from 1987 to 1988. From 1988 to 1992, he got the PhD degree in Electrical Engineering at Aalborg University in 1995. He became an Assistant Professor in 1992, an Associate Professor in 1996, and a Full Professor of power electronics and drives in 1998 at AAU Energy. From 2017 to 2023 he was a Villum Investigator and now he is co-PI of the Danish Pioneer Center for Accelerating P2X Materials Discovery (CAPeX). He is honoris causa at University Politehnica Timisoara (UPT), Romania in 2017, Tallinn Technical University (TTU), Estonia in 2018, Aalto University, Finland in 2026 and Honorary Professor at University of Parma, Italy in 2025.

His current research interests include power electronics and its applications such as in wind turbines, PV systems, reliability, Power-2-X, power quality and adjustable speed drives. He has published more than 900 journal papers in the fields of power electronics and its applications. He is the co-author of ten monographs and editor of twenty books in power electronics and its applications eg. the series (4 volumes) Control of Power Electronic Converters and Systems published by Academic Press/Elsevier.

He has received 49 IEEE Prize Paper Awards (one of them acknowledged as Time of Time paper in the IEEE Trans. on Power Electronics - doi: 10.1109/TPEL.2004.833453), the IEEE PELS Distinguished Service Award in 2009, the EPE-PEMC Council Award in 2010, the IEEE William E. Newell Power Electronics Award 2014, the Villum Kann Rasmussen Research Award 2014, the Global Energy Prize in 2019 and the 2020 IEEE Edison Medal. In 2023 he received the Hitachi Energy Award, in 2021 the EAWE Scientific Award and in 2020 the EPE Outstanding Achievement Award. He was the Editor-in-Chief of the IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS from 2006 to 2012. He has been Distinguished Lecturer for the IEEE Power Electronics Society from 2005 to 2007 and for the IEEE Industry Applications Society from 2010 to 2011 as well as 2017 to 2018. In 2019-2020 he served as a President of IEEE Power Electronics Society. He has been Vice-President of the Danish Academy of Technical Sciences. From 2020 to 2026 he was the chairman of the Danish Council for Research and Innovation Policy. Since 2020 he has been a Member of the Royal Danish Academy of Sciences and Letters as well as he is foreign member of the Romanian Academy (2021), Romania and the Estonian Academy of Sciences (2026), Estonia

He has been nominated in 2014-2021 by Thomson Reuters to be between the most 250 cited researchers in Engineering in the world.

Proceedings of the Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad

Case Study
UDK: 621.31
DOI: https://doi.org/10.24867/36WS022610

Controlled Energy Storage System for Peak Shaving and Power-Failure Bridging in Servo Drive Systems

Frederic Blank[1], Stephan Beineke[2]

[1,2] *KEBA Industrial Automation Germany GmbH, Lahnau, Germany*

[1]frederic.blank@keba.com, [2]stephan.beineke@keba.com

Abstract – *Dynamic servo drive systems are characterized by fluctuating power demands and increasing requirements for supply reliability. This paper presents a controlled electrical energy storage system and its application in two industrial servo-drive environments. The system combines a bidirectional DC/DC converter, an electrolytic capacitor module, and a control concept based on voltage droop curves and state-of-charge control. It is designed for sub-millisecond response times, high transient power capability, and operation without real-time communication. The first application addresses power-failure bridging in a high-performance injection molding machine. The second application addresses peak-power reduction in an industrial DC grid supplying CNC woodworking machines and robots. Optimized control for the active infeed converter and the energy storage system enables peak-power reduction of more than 30%.*

Keywords: capacitor energy storage, DC grid, DC/DC converter, droop control, injection molding, peak shaving, power failure, servo drive system

1. INTRODUCTION

Modern industrial machines increasingly rely on electrically driven servo systems connected through a common DC link. Such systems offer high efficiency and enable direct reuse of braking energy between drive axes. However, two challenges become increasingly relevant in highly dynamic production systems.

The first challenge is the occurrence of short-duration power peaks. Industrial servo drives, CNC machines and robotics applications can exhibit strongly fluctuating power demands due to acceleration, deceleration and process-related load changes. These peaks increase the required rating of transformers, cables, filters, fuses and power converters, even though the average power demand is significantly lower. The second challenge is the increasing sensitivity of production equipment to interruptions of the power supply. Even short mains failures can result in uncontrolled machine stops, product rejects, additional downtime and potentially mechanical damage. In highly automated production systems, maintaining the operation of critical machine functions during the first milliseconds after a power failure is often essential to avoid production losses [1], [2].

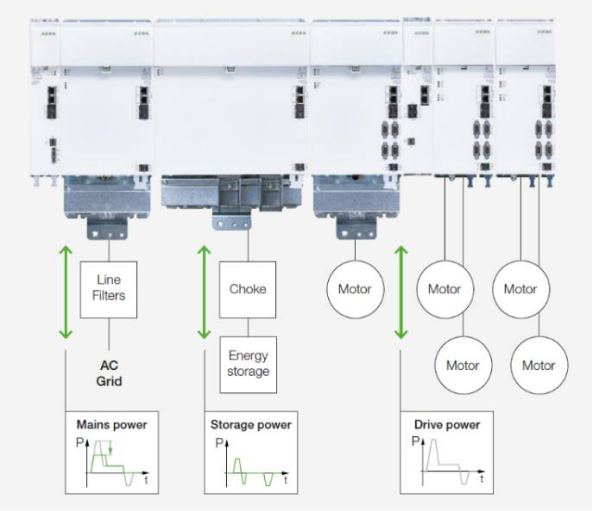


Figure 1. System overview over KEBA KeDrive D3 drive system containing an Active Power Supply Unit (left), an Energy Storage System (middle) and several Servo Drives (right).

Although power-failure support and peak-power reduction appear to be different objectives, both applications require a storage system with similar characteristics. In both cases, the system must react within milliseconds, exchange large amounts of power with the DC link and operate autonomously without dependence on external communication systems.

This paper presents a controlled capacitor-based energy storage system developed for industrial servo drive applications. The system combines a bidirectional DC/DC converter, capacitor storage and decentralized voltage-droop control with state-of-charge management. The same hardware platform is investigated in two different industrial applications. The first application demonstrates power-failure bridging in a high-performance injection molding machine. The second application demonstrates peak-power reduction in an industrial DC grid supplying CNC woodworking machines and handling robots.

The two applications were previously investigated separately for power-failure bridging [3] and peak-power reduction [4]. The present paper combines both use cases and demonstrates their realization using a common storage platform through application-specific parameterization. An exemplary drive system of the KEBA KeDrive D3 containing an Active Power Supply Unit (left), an Energy Storage System (middle) and several Servo Drives (right) is shown in Fig. 1.

The paper is organized as follows. Section 2 introduces the controlled energy storage system, including hardware and control. Sections 3 and 4 present its application to power-failure bridging and peak-power reduction, respectively. Section 5 concludes the paper.

2. CONTROLLED ENERGY STORAGE SYSTEM

2.1 Functional Requirements and Topology

Connecting additional capacitance directly to the DC link without a DC-DC converter is not sufficient for either application. The usable energy is limited because the capacitor can only discharge down to the minimum operating voltage of the connected inverters. Furthermore, direct DC-link capacitance is restricted by system protection and fault-energy considerations. A controlled DC/DC converter decouples the storage voltage from the DC-link voltage and makes a much larger fraction of the stored energy available.

The realized system consists of a bidirectional DC/DC converter, a choke L, the capacitor module, voltage and current measurement, and the embedded control. As shown in Fig. 2, two IGBT half bridges form a full-bridge, two-quadrant converter. Together with the choke, the converter controls positive and negative currents for charging and discharging the energy storage. The storage voltage u_S remains below the DC-link voltage u_{DC}. This non-isolated topology provides bidirectional current control and supports the high currents required by the power-failure application [5].

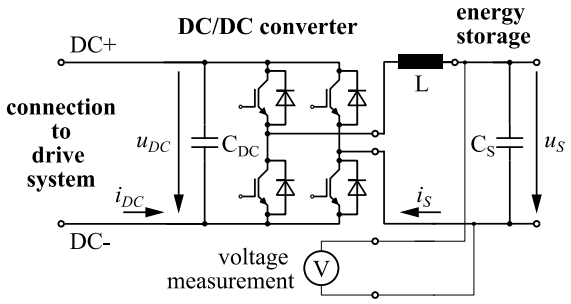


Figure 2. Components of the controlled energy storage system.

2.2 Selection and Dimensioning of the Storage

The storage technology was selected to meet the requirements of a 1 ms response time, currents up to 800 A, and an energy capacity of only a few kilojoules. Among the considered storage technologies, electrolytic capacitors provide a suitable combination of high current capability, fast response, low system complexity, and sufficient energy for the investigated applications [5], [6].

Aluminum electrolytic capacitors optimized for high current and frequent charge-discharge cycles were therefore chosen. The module capacitance is C_S = 110 mF and the maximum storage voltage is $u_{S,max}$ = 390 V, corresponding to more than 8 kJ of stored energy. The available power decreases as the capacitor voltage falls for a current-limited converter, so discharging to zero voltage is neither useful nor required. The dynamically usable energy is more than 5 kJ for a 0.5 s load interval. Additional capacitor modules can be connected in parallel when more energy is required, whereas the converter rating primarily determines the transferable power. Double-layer capacitor modules remain an option for substantially longer support durations and higher energy demands.

2.3 Control Concept

The IGBTs are operated using pulse-width modulation (PWM) with 4 kHz and the choke current is controlled by a fast subordinate loop. The current reference is calculated from a DC-link-voltage droop characteristic and a slower state-of-charge (SOC) controller. The DC-link voltage is available locally at every connected device and acts as an indicator of the instantaneous energy balance. Consequently, the storage can react without a separate power-failure detector, real-time communication or a superimposed grid controller.

The generic characteristic in Fig. 3 defines source and sink operation. If u_{DC} falls below U_{Q1}, the storage acts as a source and injects current. If u_{DC} rises above U_{S1}, it acts as a sink and absorbs energy. Slopes G and current limits set the dynamic response. Stability must be considered together with the minimum connected DC-link capacitance and the response time of all voltage-forming or current-controlled devices [7], [8].

The storage voltage is used to calculate the state of charge and enforce minimum and maximum limits. The slower SOC controller restores a defined operating point between dynamic events. Its output is limited so that the droop response has priority. For power-failure support the SOC is maintained close to the maximum. For peak shaving, the SOC setpoint is set to 95 % in the presented experiment. A lower setpoint can be selected when absorption of regenerative energy is prioritized.

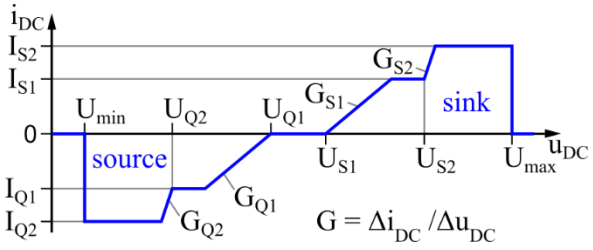


Figure 3. Generic voltage droop characteristic for source and sink operation.

Table 1. Parameters for the power failure application.

Parameter	Value	Parameter	Value
U_{min}	400 V	G_{Q1}	-30 A/V
U_{Q1}	480 V	G_{Q2}	10 A/V
U_{S1}	600 V	I_{Q1}	- 800 A
U_{max}	800 V	I_{S1}	400 A

The parameters are listed in Table 1 for a passive 400 V AC supply. The idle DC-link voltage is approximately 540 V and lies between U_{Q1} and U_{S1}. The asymmetric parameterization produces a rapid high-power response after a voltage decrease while also absorbing regenerative braking energy.

2.4 Dynamic Validation

The converter dynamics were validated in the laboratory before integration into the machines. A step was applied to the storage-current reference and measured with a current probe and oscilloscope. As shown in Fig. 4, the current reaches 800 A in less than 1 ms. This response satisfies both the peak-shaving and the power-failure requirements.

In a second test the storage was discharged at 800 A for 27 ms. The voltage decreased from 390 V to 190 V, withdrawing approximately three quarters of the stored energy. The initial power exceeded 319 kW and decreased to approximately 150 kW as the storage voltage fell. Fig. 5 confirms that the same compact storage can provide very high power for the short transition interval required by the injection molding machine.

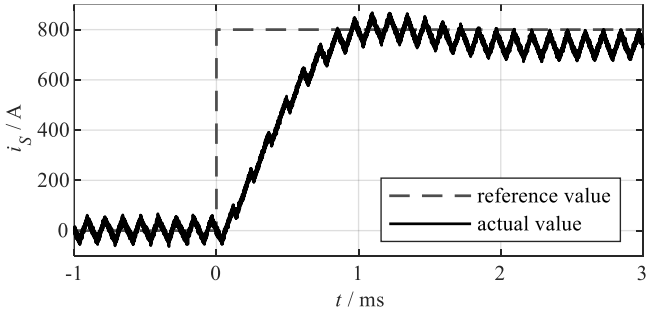


Figure 4. Measured step response of the storage current to an 800 A reference.

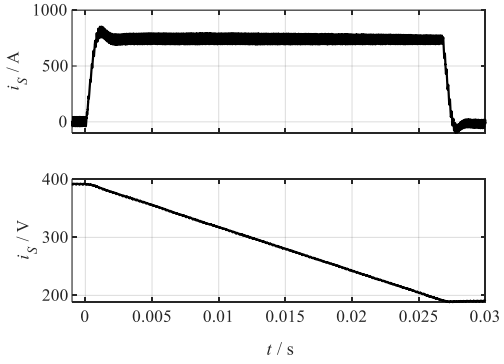


Figure 5. Fast discharge of the energy storage at 800 A for 27 ms.

3. APPLICATION 1: POWER-FAILURE BRIDGING

3.1 Injection Molding Machine and System Extension

The first application is a high-performance injection molding machine for PET preforms. The clamping unit, handling robot, screw drive, hydraulic pump and auxiliary drives are connected to a common DC link supplied from a 400 V or 480 V AC grid. The electrical nominal power of the drive system exceeds 200 kW and the mains peak power can exceed 400 kW. A common DC link already permits direct reuse of regenerative braking energy between the servo axes.

The injection process uses accumulator hydraulics because the injection step requires high power for a short period. A nitrogen accumulator, hydraulic cylinder and proportional valve provide this peak power. During the remaining cycle, a permanent-magnet motor and inverter-driven pump recharge the hydraulic accumulator at lower power. The hydraulic storage contains more than 500 kJ, which is sufficient to complete essential mechanical movements, but the motor-pump system requires approximately 200 ms to change to generator operation after a mains failure. Further details on the power-failure-bridging application and its experimental validation are provided in [3].

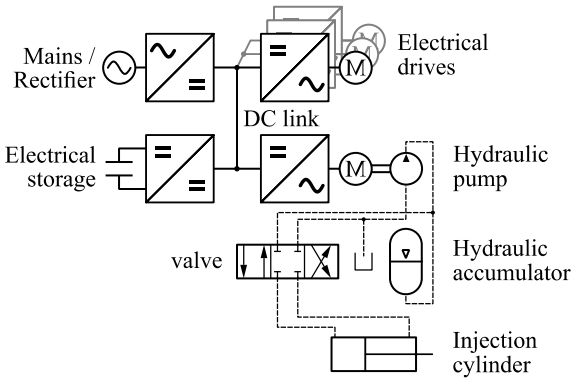


Figure 6. Overview of the injection molding drive system and connected energy sources.

The optional electrical storage is connected directly to the common DC link as illustrated in Fig. 6. With approximately 30 mF of installed DC-link capacitance and a 200 kW load, the inverter undervoltage limit would otherwise be reached within about 10 ms. The electrical storage therefore bridges the initial milliseconds, stabilizes the DC link and coordinates the transition until the hydraulic system can provide sustained energy.

3.2 Mains-Failure Sequence

According to Fig. 7 and Fig. 8, the coordinated sequence is divided into five time ranges. During time range 1, production proceeds normally. The AC mains supplies the drives, the electrical storage is charged, and the hydraulic accumulator remains near nominal pressure. When the mains fails, the DC-link voltage drops and time range 2 begins. The electrical storage detects the voltage decrease locally and supplies high power within one millisecond. The DC-link energy is thereby prevented from falling below the operating limit.

In time range 3, all electrical axes except the hydraulic injection axis perform a quick stop. Their kinetic energy is returned to the common DC link for approximately 100 ms. If this regenerative power raises the DC-link voltage, the electrical storage changes into charging operation and limits the maximum voltage. In time range 4, the motor-pump system transitions to generator operation. During the approximately 200 ms transition, the electrical storage continues to supply the remaining auxiliary demand at lower power. In time range 5, the hydraulic accumulator drives the pump as a generator and supports the DC link for several seconds. The machine can finish cooling, unlock and open the clamping unit, eject the preforms and remove the parts with the handling robot.

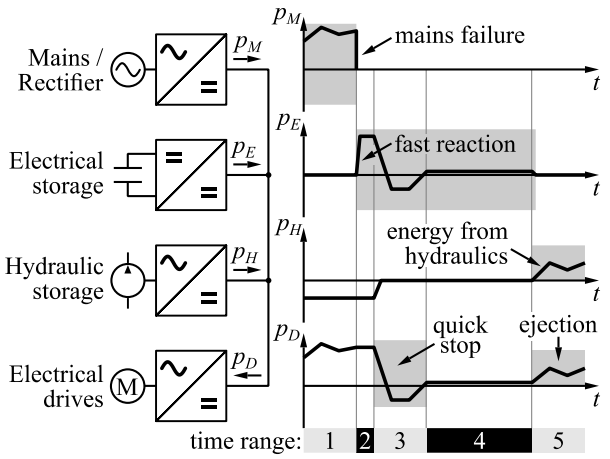


Figure 7. Power flow of the components during the five time ranges of a mains failure.

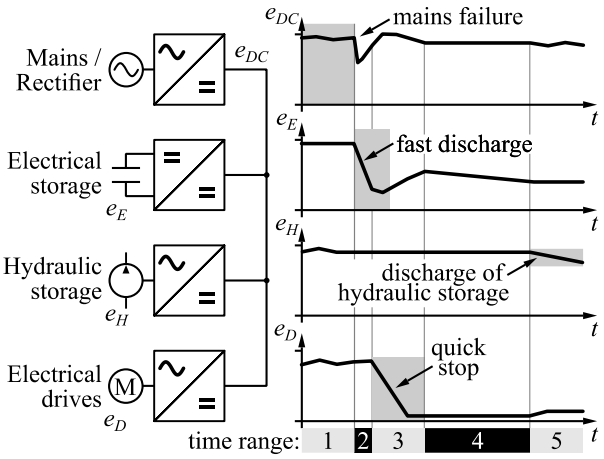


Figure 8. Energy evolution in the DC link, electrical storage, drives and hydraulic accumulator.

3.3 Experimental Results in the Machine

A power failure was initiated during production while the clamping unit was closing at t=0. Fig. 9 shows the first 100 ms. u_{DC} falls to approximately 450 V after the power failure and the electrical storage supplies about 230 kW. The voltage is stabilized after approximately 15 ms. Around 10 ms after the failure, the electrical axes start braking and their required power decreases strongly. The hydraulic pump decelerates and subsequently changes to generator operation.

The complete seven-second sequence is shown in Fig. 10. At approximately 2.05 s, after the preforms have cooled sufficiently, the clamping unit starts unlocking and opening. The pump system supplies the common DC link from the hydraulic accumulator. Ejection and handling then remove the preforms. The test completed the current cycle without rejects, after which the drives remained in standby until the AC supply returned.

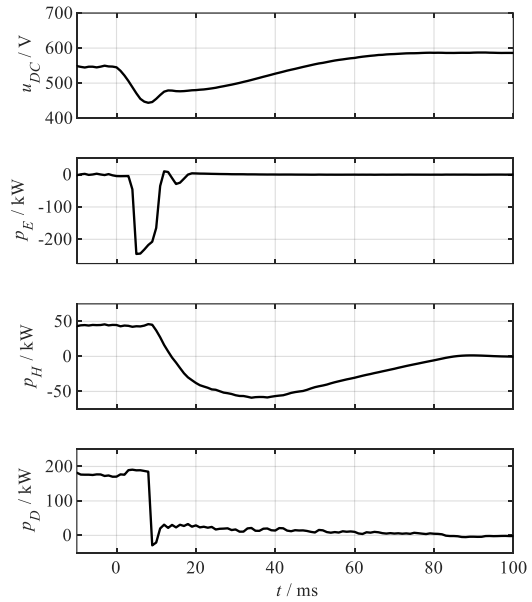


Figure 9. Measured DC-link voltage and component powers during the first 100 ms after failure.

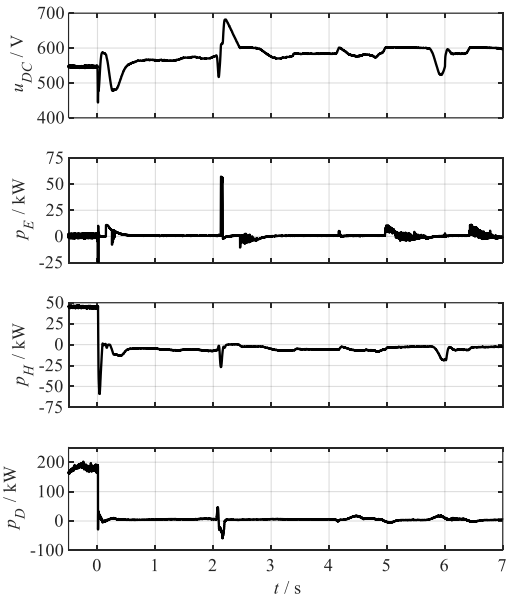


Figure 10. Complete measured power-failure sequence over seven seconds.

4. APPLICATION 2: PEAK-POWER REDUCTION

4.1 Industrial DC Grid and Load Requirement

The second application was investigated within the DC-INDUSTRIE2 research project. Further details on the peak-power-reduction application are provided in [4]. The demonstrator uses a DC grid with approximately 50 mF total capacitance, supplied from the 400 V AC grid by a controlled 30 kW active infeed. It connects three production cells with two woodworking CNC machines and two handling robots; protection devices provide fault isolation according to the industrial DC-grid concept [7], [9], [10].

Fig. 11 shows the complete demonstrator. Storage and active infeed share the DC bus and operate without direct communication. During the representative 75 s machining cycle in Fig. 12, the mean AC power is 16 kW and short peaks reach 37 kW. Although the common DC bus reuses braking energy and smooths individual drives, substantial residual peaks remain. Further measured advantages of the demonstrator are reported in [11].

These peaks can oversize transformers, lines, filters and fuses relative to the mean power. Approximately 5 kJ of usable storage energy is sufficient for a significant reduction. The storage must react within 1 ms and recover between events, which are more than 0.5 s apart, without creating a new power peak.

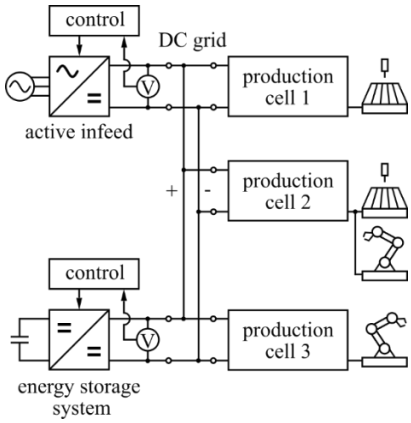


Figure 11. DC grid with active infeed, three production cells and energy storage system.

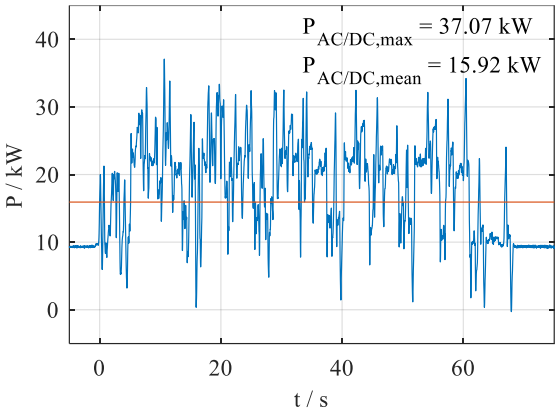


Figure 12. Measured AC power of the industrial DC grid during a representative cycle.

4.2 Application-Specific Droop Curve

Peak-power reduction is achieved by coordinating the droop characteristics of the active infeed and energy storage like shown in Fig. 3. The infeed supplies the normal load up to its current limit; a further decrease in DC-link voltage moves the storage into its source range, where it supplies the additional demand. The maximum stable slope depends on the device dynamics and the minimum connected DC-link capacitance. The droop characteristics are coordinated such that the first 26 kW are supplied by the active infeed converter, whereas additional power is provided by the energy storage system.. During regeneration the energy is first used to recharge the storage. If the storage reaches its upper SOC limit, excess energy is fed back into the AC grid. If the storage becomes depleted, additional power is supplied by the active infeed converter to maintain operation [7], [8].

4.3 Experimental Peak-Shaving Results

The storage was activated during the same representative cycle used for the baseline measurement. The upper trace in Fig. 13 shows that the active-infeed power is limited to 26 kW and the energy storage supplies the difference during the dynamic peaks. The middle trace shows that u_{DC} remains within the operating ranges defined by the breakpoints and slopes of the droop characteristics in Fig. 3. During high load, the active infeed first increases its current and the storage subsequently enters its source range once the infeed limit is reached. During low-load or regenerative intervals, the operating point returns toward the zero-current range, or the storage briefly enters its sink range. The lower trace shows the SOC. It reaches a minimum of approximately 25 %, thus leaving control reserve for changes in the load profile, and it returns toward the 95 % idle setpoint after each event.

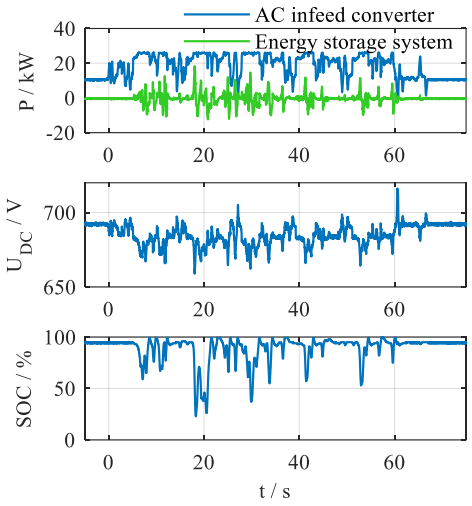


Figure 13. Measured operating principle of active infeed and energy storage under droop control.

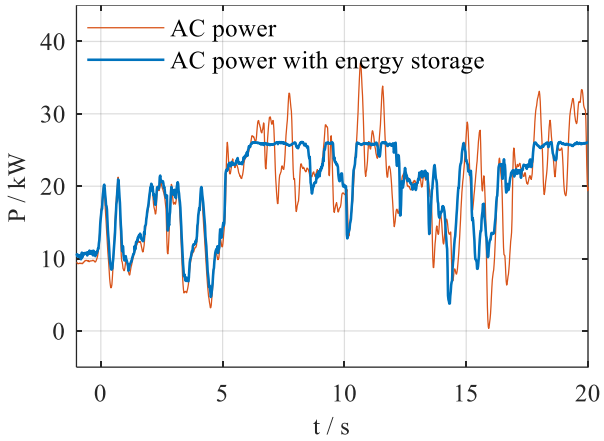


Figure 14. Measured AC infeed power without and with storage during peak-power reduction.

A direct comparison of the first 20 s is presented in Fig. 14. Without storage, the AC power reaches approximately 38 kW. With the storage active, the maximum is reduced to 26 kW, corresponding to a reduction of more than 30 %. After each clipped peak, the infeed power is temporarily slightly higher because the SOC controller recharges the storage. This controlled recovery prevents continuous discharge and prepares the system for the next peak without communication between the participating devices.

5. CONCLUSION

A controlled capacitor-based energy storage system has been presented and experimentally validated in two industrial servo-drive applications. The common platform combines a bidirectional IGBT DC/DC converter, a 110 mF, 390 V capacitor module, fast current control, voltage droop characteristics, and SOC control without real-time communication. It reaches 800 A in less than 1 ms and provides more than 300 kW in laboratory discharge tests.

Although power-failure bridging and peak-power reduction address different industrial objectives, both applications are realized using the same storage hardware and control architecture. In the power-failure application, the storage acts as a fast transient power source that stabilizes the DC link immediately after a mains interruption. In the peak-shaving application, the storage acts as an energy-management device that reduces the required grid connection power by supplying dynamic load peaks. The results demonstrate that different energy-management functions can be implemented through application-specific parameterization while retaining the same converter topology, storage technology, and control structure.

In an injection molding machine, approximately 6 kJ of stored energy bridges the initial interval after a power failure until the hydraulic accumulator and motor-pump system support the DC link, allowing the production cycle to be completed without rejects. In an industrial DC grid, approximately 5 kJ is exchanged repeatedly between the storage and the DC bus. Coordinated droop characteristics of the active infeed and storage system reduce the AC-grid peak power from approximately 38 kW to 26 kW, corresponding to a reduction of more than 30 %, while SOC control restores readiness between successive load peaks.

The presented results show that a common capacitor-based storage platform can provide both resilience against power interruptions and peak-power reduction in industrial servo-drive systems. The modular concept separates power and energy scaling, enabling adaptation to a wide range of applications through converter sizing, storage capacity, and control parameterization. The presented results demonstrate that a common capacitor-based storage platform can provide both resilience against power interruptions and peak-power reduction in industrial servo-drive systems, enabling the reuse of a single hardware and control architecture across different industrial applications.

REFERENCES

[1] BIHK, “Energiewende im Strommarkt – Versorgungsqualität,” IHK in Bayern, Munich, Germany, 2017.

[2] A. Sauer, Ed., Die Gleichstromfabrik. Munich, Germany: Carl Hanser Verlag, 2020.

[3] F. Blank, M. Hausammann, and S. Beineke, “Fast reacting 300 kW energy storage for power failure bridging in injection molding machines,” in *Proc. 26th European Conf. Power Electronics and Applications (EPE’24 ECCE Europe)*, 2024.

[4] F. Blank and S. Riethmüller, “Peak power reduction of drive systems in an industrial DC grid,” ETG-Fachbericht 172, Electromechanical Drive Systems Conference, Vienna, Austria, Nov. 2023, pp. 195–199.

[5] K. Tytelmaier, O. Husev, O. Veligorskyi, and R. Yershov, “A review of non-isolated bidirectional DC-DC converters for energy storage systems,” in *Proc. YSF*, Kharkiv, Ukraine, 2016, pp. 22–28.

[6] A. Rufer, D. Hotellier, and P. Barrade, “A supercapacitor-based energy storage substation for voltage compensation in weak transportation networks,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 19, no. 2, Apr. 2004.

[7] ZVEI, Open DC Alliance, and DC-INDUSTRIE2 Consortium, “System concept DC-INDUSTRIE2,” Feb. 2, 2024.

[8] L. Ott, M. Schulz, B. Wunder, and M. Maerz, “Investigation of stability issues in droop-controlled DC micro-grids with intermediate bus architecture,” in *Proc. PCIM Europe*, Nuremberg, Germany, 2019.

[9] H. Borcherding, J. Austermann, T. Kuhlmann, B. Weis, and A. Leonide, “Concepts for a DC network in industrial production,” in *Proc. IEEE 2nd Int. Conf. DC Microgrids*, Nuremberg, Germany, 2017, pp. 227–234.

[10] K. Askan, M. Bartonek, and K. Weichselbaum, “Power module for low-voltage DC hybrid circuit breaker,” in *Proc. IEEE 3rd Int. Conf. DC Microgrids*, Matsue, Japan, 2019.

[11] S. Warkentin, S. Puls, S. Riethmüller, F. Blank, and H. Borcherding, “Measured advantages of a production plant with DC grid in terms of energy efficiency, peak power reduction and power quality,” in *Proc. PCIM Europe*, Nuremberg, Germany, 2023, pp. 1–7.

AUTHOR BIOGRAPHIES



Frederic Blank received the Dipl.-Ing. degree in Electrical Engineering from the University of Stuttgart, Germany, in 2009 and the Ph.D. degree in 2019. His research focused on electric drive systems, energy efficiency, motors, and motion control. Since 2017, he has been working in the R&D department of LTI Motion / KEBA Industrial Automation, focusing on power electronics for servo drives, active front-end converters, and energy storage systems. He contributed to the DC-INDUSTRIE and DC-INDUSTRIE2 projects, supporting the specification and development of industrial DC grids leading to the Open DC-Alliance.

KEBA Industrial Automation Germany GmbH, Lahnau, Germany
E-mail: frederic.blank@keba.com



Stephan Beineke received the Dipl.-Ing. degree in Electrical Engineering in 1994 and the Ph.D. degree in 1999, both from the University of Paderborn, Germany. Since then, he has been working in the R&D department of LTI Motion / KEBA Industrial Automation as a R&D manager, focusing on the control of servo drives, power electronics, mechatronics and drive system solutions.

KEBA Industrial Automation Germany GmbH, Lahnau, Germany
E-mail: stephan.beineke@keba.com

Proceedings of the Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad

State-of-the-Art Review
UDK: 004:621
DOI: https://doi.org/10.24867/36WS032610

Automotive Engineering in the Age of AI and Software-Defined Vehicles

Milan Z. Bjelica[1], Bogdan Pavković[2], Ivan Kaštelan[3]
[1] *University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia*
[1]milan.bjelica@uns.ac.rs, [2]bogdan.pavkovic@uns.ac.rs, [3]ivan.kastelan@uns.ac.rs

Abstract – *Automotive engineering is undergoing a transition in which software, connectivity and artificial intelligence increasingly determine vehicle functionality throughout the complete product lifecycle. The software-defined vehicle extends development beyond the traditional point of production, as functions, operational knowledge and customer-facing features can continue to evolve after deployment through over-the-air updates. Artificial intelligence adds another dimension to this development. AI is becoming relevant not only for perception in advanced driver assistance and automated driving, but increasingly for decision making and more integrated end-to-end approaches. These developments create significant opportunities for vehicle functionality and customer experience, while at the same time increasing the importance of systematic verification, safety engineering and lifecycle management. This paper provides an editorial perspective on this changing automotive engineering landscape. Particular attention is given to AI safety, verification pipelines, continuous engineering, software-defined vehicle architectures, over-the-air updates and the emerging use of end-to-end AI. The central observation is that these topics are closely connected. Vehicles are becoming continuously evolving cyber-physical products, while safety arguments have traditionally been developed around controlled configurations and well-defined engineering baselines. Future automotive engineering therefore requires development, verification, monitoring and update processes that can preserve engineering evidence across repeated product changes. AI further extends this requirement because its behaviour depends on data, operational conditions and statistical performance in addition to conventional software correctness.*

Keywords: automotive engineering, artificial intelligence, AI safety, software-defined vehicle, OTA, verification, continuous integration, autonomous driving, customer experience

1. INTRODUCTION

Automotive development has always combined several engineering disciplines. Mechanical systems, electronics, embedded software, communication networks and control functions have gradually become parts of one tightly integrated product. During the last decade, however, the relative importance of these disciplines has shifted considerably. A growing part of vehicle functionality is determined by software, while connectivity allows that software and the information supporting it to continue evolving after a vehicle has entered operation.

The concept of the software-defined vehicle (SDV) captures much of this transition. The vehicle remains a physical machine with demanding real-time, reliability and safety constraints, but its capabilities are increasingly defined through software architectures, computing platforms, connectivity and services. This changes both engineering and the commercial relationship with the customer. A vehicle delivered today does not necessarily have to provide the same feature set, user experience or operational capability several years later.

Artificial intelligence (AI) accelerates this transition. AI has already become an important technology for perception, including recognition of vehicles, pedestrians, traffic signs, lanes and other elements of the driving environment. Its role is progressively moving toward more complex interpretation, prediction and decision-making tasks. At the same time, research is exploring more integrated architectures in which several conventional processing stages are represented by one learned model.

These developments meet at an important engineering point. Software-defined vehicles encourage frequent evolution. AI itself can evolve through new models, new datasets and new operational evidence. Safety engineering, in contrast, requires confidence that a particular vehicle configuration satisfies its requirements and achieves an acceptable level of risk. Modern automotive engineering therefore needs ways to combine product evolution with controlled engineering evidence.

This paper discusses this situation from a broad automotive engineering perspective. The focus is on the relationship between AI, AI safety and verification, SDV and OTA paradigms, customer experience, continuous engineering and emerging end-to-end AI approaches. The objective is to identify how these developments fit into

one engineering lifecycle and where the main challenges for research and industry currently lie.

2. THE VEHICLE AS A CONTINUOUSLY EVOLVING PRODUCT

The SDV represents more than an increase in software content. Its larger consequence is that the vehicle becomes an evolving product after production.

Traditional vehicle development is naturally described through a V-model. Requirements are refined into system architecture, detailed design and implementation. Verification then proceeds from individual implementation units toward subsystem and complete-system verification, followed by validation of the final product. Configuration management, change management and traceability provide control over this process.

This model remains useful for modern vehicles, although the lifecycle increasingly contains repeated iterations of the V rather than one major development cycle followed by relatively limited maintenance. Software can be modified after release. New functionality can be introduced. Operational information can be refreshed. AI models may be retrained. Changes discovered through fleet operation can return to development and result in another vehicle release.

Over-The-Air (OTA) distribution provides the technical mechanism enabling much of this lifecycle. For autonomous and highly automated systems, OTA can also maintain part of the vehicle's operational knowledge. Environmental models, maps and other reference information can be refreshed without physically accessing each vehicle. This can be understood as continuous maintenance of the vehicle's expected representation of its operating environment.

Stored operational knowledge nevertheless remains only one input to automated driving. The actual environment changes continuously. Construction zones appear; temporary objects enter the road, weather changes and road conditions evolve. Live sensing and perception therefore remain essential even when detailed environmental information is maintained through connectivity.

The same infrastructure has a strong customer-experience dimension. The customer increasingly interacts with a product whose functionality can evolve during ownership. Vehicle features, digital services and user-facing behaviour become part of a continuing relationship between the product, the manufacturer and the supporting cloud ecosystem. This is one reason why SDV development connects engineering with broader consumer experience (CX) strategies.

There is, however, an important difference between updating a customer-facing convenience function and changing behaviour that contributes to vehicle safety. The technical capability for frequent OTA deployment does not imply that every software component can follow the deployment practices familiar from consumer web services. The more strongly an update influences vehicle behaviour, the more engineering evidence must accompany the release.

3. AI AS PART OF THE AUTOMOTIVE SYSTEM

AI safety is easiest to understand when AI is treated as another technology within the complete vehicle rather than as an isolated object.

Classical automotive safety engineering addresses failures in hardware and software through established processes such as those defined by ISO 26262 [1]. Safety of the Intended Functionality, addressed by ISO 21448 [2], extends the discussion toward situations in which no component has failed but the intended functionality becomes insufficient under particular operating conditions. AI introduces further causes of unsuitable behaviour associated with aspects such as model specification, training data, generalization, performance metrics and operating-domain coverage. ISO/PAS 8800 [3] places these concerns into an automotive safety-engineering context.

Consequently, several safety perspectives coexist in an AI-enabled vehicle. Hardware can fail. Conventional software can contain faults. Sensors and algorithms can be functionally insufficient under difficult conditions. An AI model can perform poorly within a particular data slice even while its execution platform operates correctly. Connected systems also introduce cybersecurity concerns that interact directly with software-update and safety mechanisms. [4]

The practical engineering task is therefore to determine how an automotive system containing AI can achieve acceptable safety. The established system-level concepts remain relevant: hazards, risk assessment, safety goals, safety requirements, architectural safety measures, verification, validation, traceability and a supporting safety case.

AI adds new evidence to this process. Dataset representativeness must be considered. Performance needs to be evaluated within meaningful portions of the operational design domain (ODD) rather than exclusively through overall averages. Robustness against plausible changes in the input becomes important. Runtime conditions such as computing load, model quantisation, stale data or invalid intermediate values can influence behaviour. Operational monitoring provides another source of evidence once the system is deployed.

Methods for discovering hazards must also evolve. Hazard and Operability (HAZOP)-style analysis can be applied early to functions and requirements, including deviations related to inputs, outputs, data and operating conditions. Once the architecture is sufficiently defined, System-Theoretic Process Analysis (STPA) can examine unsafe control actions and interactions between AI and conventional components. Exploratory AI-specific probes can complement these structured methods by searching for issues such as dataset blind spots, shortcut learning, inconsistency under moderate input transformations, uncertainty problems and unexpected behaviour close to operational boundaries.

None of these activities alone provides sufficient confidence. Their value comes from their combination within the engineering process. [5]

4. VERIFICATION IS BECOMING A PIPELINE

The increasing complexity and update frequency of vehicle software also changes the practical interpretation of verification.

At implementation level, automated checks can already be integrated into continuous integration environments. Software units can be verified whenever relevant implementation changes occur. Integration testing then evaluates interactions between complete subsystems. At vehicle level, simulation and physical testing provide evidence for complete system behaviour. Fault injection is particularly useful for checking whether safety mechanisms correctly recognize abnormal conditions and initiate the expected fallback or safe response.

AI introduces further verification dimensions. The trained model, its training and validation basis, relevant datasets, operating-domain assumptions and performance targets become part of the configuration being verified. A software change may leave an AI model untouched while changing its runtime behaviour. Similarly, a new model may leave the conventional software architecture unchanged while materially changing the behaviour of the vehicle.

For this reason, verification increasingly resembles a pipeline connecting several forms of evidence: *implementation verification → integration verification → scenario and simulation evaluation → vehicle-level testing → safety evaluation → release → operational monitoring*.

Operational evidence can then feed another engineering cycle: *operation → event or insufficiency detection → data acquisition → analysis or retraining → verification → controlled release → operation*.

This resembles continuous software engineering, but the safety implication is important. Continuous integration can run continuously; safety-relevant deployment remains conditional on sufficient evidence.

Traceability becomes particularly valuable in this environment. When a component, model, dataset, requirement or ODD assumption changes, engineers need to identify which safety analyses and verification results may have become invalid. A mature verification pipeline therefore needs more than automated test execution. It needs configuration awareness and links between requirements, hazards, safety measures, implementations and the evidence supporting them.

This can also make verification more efficient. A change with a limited and well-understood impact should not necessarily require repeating every activity ever performed on the vehicle. At the same time, confidence in such selective re-verification depends on strong traceability and reliable impact analysis.

5. OTA AND THE SAFETY CASE

OTA updates make the relationship between software evolution and safety particularly visible.

A safety argument always refers, explicitly or implicitly, to a particular product configuration and a defined operating environment. If an update materially changes the behaviour relevant to that argument, previously collected evidence cannot automatically be assumed to remain valid.

This becomes especially important for AI. Consider a perception model that is retrained after new operational data reveal an insufficiency. The updated model may resolve the original problem and simultaneously behave differently in other parts of the ODD. A successful update should therefore be treated as a new behavioural configuration whose relevant properties must again be demonstrated.

The same principle applies more broadly to software-defined vehicles. OTA infrastructure enables deployment, while engineering governance determines whether deployment is justified. An effective continuous engineering process therefore connects update management with verification and the safety case.

Field monitoring becomes part of this loop. Events such as interventions, fallback activations, repeated low-confidence situations or unexpected task violations can reveal weaknesses that were insufficiently represented during development. Once such a condition has been understood as a repeatable safety-relevant insufficiency, it should become an explicit engineering issue with mitigation and verification rather than remain hidden inside aggregate field statistics.

This creates an interesting convergence between SDV engineering and safety engineering. SDV platforms provide the technical ability to collect evidence and improve deployed systems. Safety processes provide the

discipline needed to decide what may be changed and what evidence is required before that change reaches the fleet.

6. END-TO-END AI AND THE VERIFICATION CHALLENGE

End-to-end AI represents a further architectural direction with important consequences for automotive verification.

A conventional automated-driving architecture can expose relatively clear functional boundaries between perception, localisation, prediction, planning and control. These boundaries provide interfaces that can be specified and tested. They also make it possible to analyse how uncertainty or an upstream error propagates through the system.

A more integrated learned architecture may combine several of these transformations. Such an approach can reduce manually designed interfaces and allow the model to optimize behaviour across a larger portion of the driving task. The corresponding verification problem becomes more strongly associated with the behaviour of the complete function.

This shifts attention toward task-level requirements and observables. The engineering process needs a precise definition of what constitutes correct or unacceptable behaviour under defined operating conditions. Task-level invariants, runtime supervisors, independent monitors and safety-related subsystems become valuable because they can observe relevant behaviour without depending entirely on the internal decomposition of the AI model.

The ODD also becomes increasingly important. A claim that an end-to-end system performs adequately has little meaning without specifying the operational conditions represented by the claim. Performance observed in one environment cannot simply be generalized to another environment with different traffic, illumination, road geometry, temporary obstacles or interaction patterns.

End-to-end models also make exploratory verification important. Scenario-based testing, physically plausible perturbations, meaningful data slices, metamorphic consistency checks and operational monitoring provide different views of system behaviour. The objective is to accumulate complementary evidence rather than depend on one global performance metric.

Architectural safety mechanisms can additionally constrain the AI system. Independent monitoring, safety envelopes, fallback behaviour and restrictions of the allowed ODD can limit the consequences of inappropriate AI outputs. These mechanisms allow safety arguments to remain partly architectural even when the internal AI implementation becomes increasingly integrated.

7. FROM VERIFICATION TO CONTINUOUS SAFETY ENGINEERING

The broader change in automotive engineering can therefore be described as a transition toward continuous evidence management.

A traditional release establishes a baseline. The SDV makes that baseline temporary. AI makes some of its behavioural properties dependent on data and operational experience. OTA enables a new baseline to be distributed rapidly. Field connectivity then provides information about how that baseline behaves in actual operation.

This lifecycle creates a circular relationship between development and operation. Verification is no longer located only near the end of product development. Evidence is generated during requirements engineering, safety analysis, model development, software implementation, simulation, vehicle testing and field operation.

For AI-enabled vehicles, four questions become particularly important for every significant release:

1. **What changed?**

This includes software, models, datasets, parameters, operational assumptions and supporting environmental information.

2. **What behaviour can the change influence?**

Traceability and impact analysis need to connect the change to functions, hazards, safety measures and ODD assumptions.

3. **What evidence must be regenerated?**

Verification should address the affected implementation and the system-level consequences of the change.

4. **What should be monitored after deployment?**

Residual uncertainty remains, particularly for complex AI behaviour. Runtime and fleet evidence therefore form part of the continuing safety argument.

A useful consequence of this viewpoint is that continuous engineering does not require abandoning the V-model. Each meaningful release can be regarded as another controlled iteration through the relevant portions of

that process. Automation makes such iterations practical, while safety engineering determines their required rigor.

8. DISCUSSION AND RESEARCH OUTLOOK

Several research directions emerge from this combined view of AI, SDVs and continuous automotive engineering.

The first concerns verification scalability. Scenario spaces for automated vehicles are extremely large, and AI adds further variation through data and model behaviour. Verification therefore needs intelligent selection and combination of evidence. Simulation, structured scenarios, AI-specific probes, statistical evaluation, system testing and field monitoring each address different parts of the problem.

The second concerns quantitative interpretation of AI behaviour. Classical vehicle reliability engineering can reason in terms of component failure rates and system reliability models. AI evidence more commonly appears as test results, failed scenarios, interventions or observed behavioural insufficiencies. Creating useful interfaces between these forms of evidence could support architecture-level decisions and risk acceptance without reducing AI safety to a single performance number. Behavioural measures based on clearly defined automation-task violations are one possible direction. [6]-[7]

The third concerns the safety case itself. A continuously evolving vehicle requires a safety argument that can evolve in a controlled manner. Research and industrial tooling therefore need to support incremental evidence, impact analysis and configuration-dependent safety claims. The long-term objective should be a safety case that remains connected to the actual software and AI configuration deployed in the vehicle.

A fourth question concerns architectural evolution. Modular AI architectures provide useful engineering boundaries, while end-to-end models may offer performance and development advantages for increasingly complex driving tasks. Automotive engineering will need practical methods for obtaining sufficient observability, verification and safety control at whichever abstraction level the architecture exposes.

Finally, the relationship between customer experience and engineering assurance deserves attention. OTA makes continuous product improvement visible to customers and can extend the useful functionality of a vehicle throughout its lifetime. The same update infrastructure also becomes part of safety maintenance. Industry therefore must reconcile the commercial desire for rapid evolution with the evidence requirements of a safety-related cyber-physical system.

Risk acceptance remains the final engineering question. Comparative principles such as Globally at Least Equivalent (GAME) can ask whether an automated solution performs at least as safely as an accepted reference, while absolute approaches such as Minimum Endogenous Mortality (MEM) consider the residual contribution of the technical system to risk. Whatever criterion is selected, confidence ultimately depends on a chain of evidence connecting the deployed system to its actual operational behaviour.

9. CONCLUSION

Automotive engineering is moving toward a lifecycle in which the vehicle continues to change after it enters operation. Software-defined architectures, connectivity and OTA updates enable this transition, while AI expands both the capabilities of the vehicle and the complexity of demonstrating its behaviour.

These developments make verification increasingly continuous. Software tests within continuous integration environments form only the first layer. Integration testing, simulation, scenario-based evaluation, vehicle testing, fault injection, AI-specific verification, safety analysis and operational monitoring need to contribute to one connected evidence pipeline.

AI safety fits naturally into established automotive safety engineering when the complete system remains the object of the safety argument. ISO 26262, SOTIF and AI-oriented safety activities address different causes of hazardous behaviour, while traceability and the safety case connect them throughout the development lifecycle.

End-to-end AI may shift some verification from internal component boundaries toward task-level and system-level behaviour, making clear ODDs, runtime monitoring, independent safety mechanisms and systematic behavioural testing increasingly important.

The resulting automotive engineering paradigm is therefore one of continuous product evolution combined with controlled evidence evolution. OTA provides the means to change the vehicle; AI and software provide much of the reason to change it; verification and safety engineering determine when those changes are ready for deployment. Establishing efficient ways to maintain this relationship is likely to remain one of the central engineering challenges of the software-defined and AI-enabled vehicle.

FUNDING

This publication was co-funded by the European Union (Interreg IPA CBC Croatia-Serbia programme, project

CySafe SmartMob, grant number HR-RS00269). Its contents are the sole responsibility of the authors and do not necessarily reflect the views of the European Union.

DECLARATIONS

The authors declare no conflict of interest. The data availability is not applicable.

REFERENCES

[1] ISO 26262, *Road Vehicles — Functional Safety*.
[2] ISO 21448, *Road Vehicles — Safety of the Intended Functionality*.
[3] ISO/PAS 8800, *Road Vehicles — Safety and Artificial Intelligence*.
[4] ISO/SAE 21434, *Road Vehicles — Cybersecurity Engineering*.
[5] Automotive SPICE, *Process Assessment Model*.
[6] M. Z. Bjelica and B. Mrazovac, "Reliability of Self-Driving Cars: When Can We Remove the Safety Driver?," *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 15, no. 4, pp. 46–54, 2023.
[7] M. Z. Bjelica, *Reliability Estimation for a Central Vehicle Computer with Upgradeable Software Components*, Master's Thesis, University of Applied Sciences – FH Campus Wien, 2021.

AUTHOR BIOGRAPHIES



Dr. Bjelica is the Full Professor at the FTN Uni Novi Sad, a Functional Safety Instructor at the University of California San Diego, and the CEO of NIT Institute. He actively participates in research and innovation activities for various computer-engineering sectors, focusing on consultancy and training in the fields of system safety, functional safety, automotive engineering, and consumer electronics. During his career, he consulted companies in the automotive industry (ZF Germany, TTTech Austria, Qualcomm Automotive USA, Daimler Germany) and also other companies in consumer electronics, industrial machinery, and computing domains. He is a frequent participant and a speaker at major industry events worldwide. Dr. Bjelica holds a Ph.D. degree in computer engineering from the University of Novi Sad, Serbia, as well as an Academic Safety Engineer degree from the FH CampusWien - Vienna Institute for Safety and Systems Engineering (Austria). His professional and research focus is on complex system and software architectures with specific interactions and virtualization. He authored over 100 publications across major journals and scientific conferences and holds 30 patents.



Dr. Pavkovic is the Functional Safety Consultant and Instructor at the University of California San Diego; Associate Professor at the Faculty of Technical Sciences - University of Novi Sad; CTO of NIT Institute; and ex Technical Group Lead and Software Architect at the TTTech Automotive. He focuses on application of Functional Safety and SOTIF for software-defined vehicles in automotive production projects for the industry leading OEMs across several design centres in Europe. He was in charge of around 30 people working on cutting edge computer vision and machine learning optimizations for embedded automotive platforms for top-tier OEMs from both camera and lidar domain, with regard to their appropriate design and utilization with regard to safety. He has extensive professional experience in planning, executing, leading, supporting and analysing research projects and technologies in computer engineering, communication technologies and automotive software.



Dr. Kastelan is the Full Professor at the University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences. His teaching and research interests are the design of digital and computer systems, algorithm design, and engineering education. During his research work, he worked on the problem of verification of consumer electronics devices with touch screens, and the development of platforms and teaching materials for the needs of engineering education in the field of computer engineering. He participated in various European, national and provincial projects, and is currently a team coordinator in the project, funded by the Interreg IPA Cross-border Cooperation Programme Croatia-Serbia, which aims to establish living laboratories and develop study materials for courses in the topics of artificial intelligence, functional safety and cybersecurity. He is the author or co-author of more than 10 papers in international and national journals, over 100 papers in conference proceedings, 13 technical solutions, 13 patents, a textbook and a problems book.

Proceedings of the Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad

State-of-the-Art Review
UDK: 621.39
DOI: https://doi.org/10.24867/36WS042610

6G Evolution Towards Connected Intelligent Machines

Dejan Vukobratovic[1]
[1] *Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia*
[1]dejanv@uns.ac.rs

Abstract – The evolution towards 6G raises a fundamental question: will future mobile networks connect machines more efficiently, or will they become an integral part of intelligent systems? This overview paper explores this question through the concept of task-oriented communications, which shifts the focus from faithfully transmitting data towards delivering the information needed to accomplish a task. We illustrate these ideas through two connected-robotics scenarios investigated in our research: semantic communication of 3D point clouds for industrial object recognition, and edge-based robotic localisation and mapping supported by 5G/6G connectivity. These examples highlight how communication, computation and sensing can be designed together to support potentially the fundamental role of 6G technology, that is to connect intelligent machines.

Keywords: 5G/6G, Task-oriented communications, Semantic communications, Connected robotics

1. INTRODUCTION

Mobile networks have evolved from connecting people through voice and data to supporting an increasingly diverse range of connected machines. As artificial intelligence (AI) advances, the next step materialised in 6G network standards may be to connect intelligent machines such as robots, autonomous vehicles and AI-driven systems that perceive, reason and act [1], [2]. This evolution raises new questions about what future networks should communicate, how they should process information, and how they can support the tasks performed by connected intelligent machines [3].

This paper explores these questions following the evolution of the emerging concept of task-oriented communications and focusing as use case examples on two connected-robotics scenarios investigated in our research. We first consider how the vision of 6G is evolving, then introduce the idea of communicating task-relevant information rather than simply reconstructing transmitted data. Finally, we illustrate this approach through industrial robotics communication and mobile-robot localisation using edge computing and 5G/6G infrastructure. Together, these examples offer a perspective on how communication, computation and sensing may become increasingly integrated as networks evolve towards 6G.

2. MOBILE NETWORK EVOLUTION TOWARDS 6G

Mobile networks have evolved from systems designed primarily for voice communication into platforms that connect people, machines, and services across the world. With 6G on the horizon, the question is not simply how to make these networks faster or more reliable, but whether they will need to play a different role altogether. As AI models increasingly move from data centres into robots, autonomous vehicles, and software agents, the network may become part of a much larger intelligent system rather than merely a means of transporting data. This section explores what that shift could mean, first by considering the emergence of intelligent machines and then by looking at how the vision of 6G is taking shape.

2.1 Connecting Intelligent Machines

In the past five decades, mobile cellular networks evolved through five generations of mobile systems. We are now at the brink of the sixth generation (6G). If we look back at the previous generations, it is not so easy to classify them. We often hear a common wisdom: the even generations were successful, while the odd generations failed. But perhaps this is looking at the history from a simplified perspective.

Let us recapitulate this evolution. 1G gave us mobile voice service. 2G made voice digital, scalable and truly global. 3G brought mobile data. 4G turned that data capability into seamless broadband connectivity. 5G shifted the ambition beyond connecting humans towards connecting machines. So perhaps the "odd generations" were not failures at all. Perhaps they were the generations that introduced new directions, while the following generation consolidated them and brought them to scale. If the above sequence of generations introduced voice - digital voice - data - broadband data - machines, what is the keyword 6G will bring in? If 6G is simply about making connected machines faster, more reliable, more efficient and more ubiquitous, this is exactly the expected consolidation and scaling step: communications has always progressed through a combination of technological innovation and massive engineering and economic scaling.

But if 5G is about connecting machines, the logical keyword for 6G could be connecting *intelligent machines*. Note that when 5G was concieved (early 2010s), the AI models and tools were only at their infancy and their evolution was, at the time, hard to predict. The distinction between connecting machines and connecting intelligent machines may be way more important than another increase in peak data rate.

We are entering a world in which machines are no longer just endpoints that generate data or execute commands. They increasingly perceive, reason, communicate and act. Some are physical, so called embodied intelligence, such as robots, autonomous vehicles, humanoids and other embodied intelligent systems [4]. Others are purely software, such as AI agents, assistants and autonomous digital services [5]. These two forms of intelligence may create very different demands on the network.

Physical intelligent machines interact continuously with the physical world. Besides connectivity, they need sensing, perception, coordination and increasingly distributed intelligence. If these machines are no longer confined to a factory or a controlled environment, connectivity becomes considerably more complex problem, related not only to data rates and latency, but essentially to their capability to safely and reliably execute tasks. Software-based intelligent machines are different. They already run on our phones and in the cloud. Today their communication footprint may still be modest, but token exchange is growing very fast and that could change substantially depending on how human-AI and AI-AI interaction modes evolve.

2.2 Evolution of Mobile Network Standards Towards 6G

Crucial to the success of mobile networks lies in the global standardization coordinated by International Telecommunications Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T) and technically executed by 3rd Generation Partnership Project (3GPP). When 5G was being conceived in early 2010s, the key idea of what 5G would bring has been visually represented by famous "5G service triangle". The idea was to extend 4G in three directions corresponding to three different services 5G network would offer. The principal service, called enhanced mobile broadband (eMBB), would extend the capabilities of 4G mobile broadband. The other two: massive machine-type communications (mMTC) and ultra-reliable low-latency communications (URLLC) were behind the 5G as the technology that aimed to connect the machines.

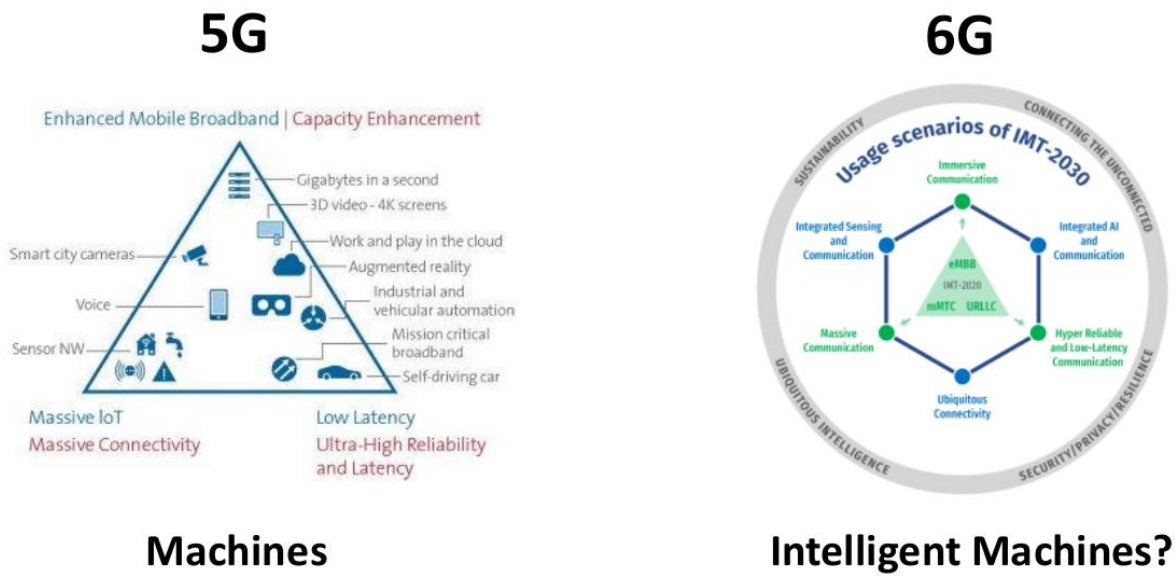


Figure 1. From 5G triangle to 6G hexagon [6]

In the past several years, conceptual design of 6G extended the notion of 5G triangle to the 6G hexagon (Figure 1). The idea is to extend 5G with three novel features: Integrated AI and Communication, Integrated Sensing and Communication, and Ubiquitous Connectivity. If 6G will be the technology to enable connected intelligent machines, then indeed, these three pillars constitute some of the key underlying features. But let us inspect this more closely.

With the aim of connecting intelligent machines, the main target of 6G is no longer "How much more capacity will 6G provide?" Instead, the main design problem can be broadly formulated as "What does the 6G network need to become when the endpoints themselves become intelligent?" This changes the role of the network.

Regarding the first new pillar of 6G: Integrated AI and Communication, in 3GPP, a lot of effort has been spent in discussing and standardizing the AI for the network, i.e., using machine learning and AI in optimising different network functionalities across the core network and the RAN such as scheduling radio resources, predicting traffic, automating operations and managing increasingly complex networks [7]. Significantly less effort is invested in standardizing the network for AI, although recently, frameworks such as AI/ML enablement (AIMLE) at the service level are arising to fill this gap [8]. As the network becomes integral part of the computing and intelligence infrastructure itself, communication, computation, sensing and AI increasingly interact rather than remain separate functions.

The second 6G pillar: Integrated Sensing and Communication (ISAC) is active topic of 3GPP standardization effort. We have moved from thinking of wireless systems purely as communication systems towards integrated sensing and communication. But for intelligent machines, we need to go one step further. The machine does not experience the world through RF sensing alone. It sees, hears, measures, localises and interacts through multiple sensing modalities. The network could become part of a much broader multimodal sensing infrastructure, with AI bringing these different observations together. Current 3GPP focus is leaned towards radar-like functionalities of future wireless interface, while most of the end-users (robotic, vehicular or similar industries) place focus on different modalities. This raises important question who will be the commercial user of 6G ISAC service in the future.

Finally, 6G targets ubiquitous connectivity. 5G already had the ambition of connecting essentially everything. Non-terrestrial networks (NTN) can extend that reach and help complete that vision. But for intelligent machines, ubiquitous connectivity may mean something more than simply having coverage everywhere. It means providing the connectivity, sensing and computational support wherever intelligent machines operate, including environments where infrastructure cannot be assumed. Thus it is reasonable to expect that the former two pillars will be of immediate importance for 6G connectivity of intelligent machines, while NTN and ubiquitous connectivity will complete the 5G ambition of connecting machines anytime and anywhere.

3. FROM COMMUNICATING DATA TO COMMUNICATING MEANING

Imagine a mobile robot navigating through a factory. Its cameras and LiDAR sensors continuously generate images and three-dimensional point clouds containing millions of measurements. Should the robot transmit all this information to a remote server at the edge or cloud, or could it transmit only the information needed to estimate its position, recognise an obstacle or plan its next movement? The answer depends on what we expect the communication system to accomplish.

This simple question captures the motivation behind task-oriented communications, also known as goal-oriented communications. Instead of treating the faithful error-free delivery of data as the ultimate objective, task-oriented communications starts from the task that the receiving system must perform. The communication system is then designed to preserve the information that matters for that task, potentially reducing the amount of data that needs to be transmitted while maintaining the required task performance.

3.1 From Bits to Tasks

Modern communications are built around a remarkably successful principle: represent information as bits, transmit those bits reliably, and reconstruct the original information exactly at the receiver. This approach follows the foundations of information and coding theory established by Claude Shannon [9]. Its success is visible everywhere, from mobile broadband and video streaming to industrial communications.

A conventional communication system typically separates the problem into several stages. First, source coding compresses the original data. Channel coding adds redundancy to protect the information against transmission errors. Modulation and waveform processing then prepare the information for transmission over a wireless channel. At the receiver, the corresponding operations recover the transmitted information.

This architecture works extremely well when the objective is to reproduce the original message, the goal established by Shannon. But intelligent machines introduce a different perspective. If a remote AI model needs to identify a particular object in a camera image, does it really need every detail of that image? If a robot needs to estimate its position, must the network deliver an exact reconstruction of every LiDAR measurement? Often, the answer is no.

What matters is not necessarily how accurately the original data can be reconstructed, but how well the receiving system can perform its task. A slightly distorted image may be perfectly adequate for recognising an object, while a visually excellent reconstruction might lose a small detail that is essential for robotic manipulation. The best representation of data depends on what we intend to do with it.

This is the central intuition behind task-oriented communications [3], [10]. Rather than optimising communication solely for bit-level accuracy or conventional measures of signal distortion, we consider the performance of the task itself. The relevant objective might be object-recognition accuracy, robot localisation error, the success rate of a manipulation operation or the stability of a control system. Communication system can be designed and its resources allocated according to how much they contribute to achieving that objective.

3.2 Learning What Information Matters

How can a communication system learn which information is important for a task? One possibility is to improve conventional compression. Images, video and three-dimensional point clouds can already be compressed before transmission, reducing the required bandwidth while attempting to preserve their important features. These techniques provide a useful starting point, but they generally aim to reconstruct the source data, rather than directly optimise the performance of a remote AI task.

A more radical approach is to design the communication and AI processing together. Deep learning makes this possible by representing different processing stages as interconnected neural networks. Instead of designing each stage independently, it becomes possible to train an end-to-end system to transform sensor measurements into a compact representation that can be transmitted over a wireless channel.

An important step in this direction is deep joint source-channel coding [11]. In contrast to a strictly separated compression and channel-coding architecture, a learned system can jointly adapt its

representation to the characteristics of the communication channel. Such approaches have demonstrated promising results, particularly when transmission conditions are challenging. However, if the objective remains the reconstruction of the original image or point cloud, the system is still fundamentally solving a data-reconstruction problem.

Task-oriented communications takes the idea further. Suppose a robot's camera captures an image containing a workpiece. Instead of transmitting the image for reconstruction, the system could extract features relevant to the downstream task and transmit those features to a remote AI model. Depending on the application, the transmitted representation might encode the object's position, its geometric characteristics or other information needed for recognition and manipulation. The receiver uses this representation directly, without necessarily reconstructing the original image.

The important distinction is that the transmitted representation is designed around the task, rather than around the appearance of the original data. It may therefore be compact, task-specific and very different from the sensor data itself. This approach usually referred to as semantic communications, which investigates how to represent and transmit information according to its meaning and intended use. In this context, semantics does not simply mean converting data into words or human-readable descriptions. For an intelligent machine, useful semantic information may consist of learned numerical features that preserve the information required by a particular AI model. However, the task-oriented communication is still an open problem, both from the perspective of theoretical limits, as well as the specific transmitter and receiver design (Figure 2).

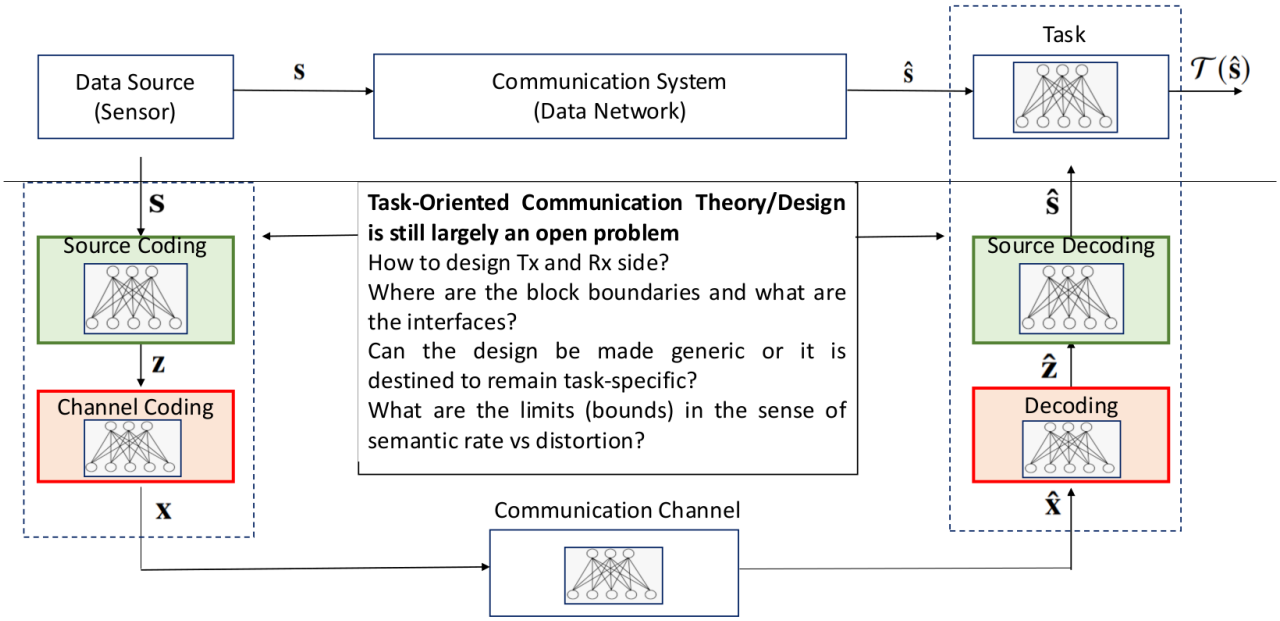


Figure 2. Task-oriented communication system design challenges

3.3 Why This Matters for Connected Robotics

Connected robotics offers a natural setting for exploring these ideas. Robots increasingly rely on cameras, LiDAR, inertial sensors and other sources of information to perceive their surroundings, estimate their position and coordinate their actions. These sensors usually generate large volumes of data, while the processing required to interpret that data may be computationally demanding.

Wireless connectivity creates an opportunity to distribute or completely offload this processing between the robot, nearby edge computers and more powerful cloud infrastructure. However, sending all sensor data to a remote server can consume substantial communication resources and introduce delays. On the other hand, moving all computation onto the robot may be impractical when its size, cost, energy consumption or available processing power is limited.

Task-oriented communications offers a way to approach this trade-off. The robot can partly process its sensor data locally, extract information relevant to a particular task and transmit a compact representation to an edge AI service. The remote system can then perform the required inference or contribute to a larger processing pipeline. The appropriate division of work depends on the task, the

available computing resources, the wireless channel and the consequences of errors or delays [12].
This does not mean that transmitting raw data or reconstructing it at the receiver will become unnecessary. Some applications require detailed sensor information, and a representation optimised for one task may be unsuitable for another. A representation useful for object recognition, for example, may discard geometric details needed for precise manipulation. Task-oriented communication therefore introduces new design questions: which information should be retained, how should its representation be learned, and how should the system balance communication cost against task accuracy and reliability?
These questions remain active areas of research. There is no single semantic representation that is optimal for every task, nor is there yet a universally applicable mathematical theory and consequently design framework that determines the best transmitter, receiver and communication architecture for arbitrary tasks. An important challenge is to develop methods that preserve task-relevant information while remaining robust to changing wireless conditions and practical enough to integrate into real communication systems [12], [13].
As 6G networks increasingly support intelligent machines, communication can become more closely integrated with sensing, computation and control. Instead of treating sensor data as an end product that must be delivered intact, the network can become an active part of the process through which machines perceive their environment and accomplish their goals. In this sense, task-oriented communications represents a shift in perspective: from asking how faithfully we can transmit data to asking how effectively we can help a machine accomplish its task. The following section explores what this shift can mean in practice through connected-robotics use cases investigated jointly by the two teams at the University of Novi Sad - Faculty of Technical Sciences and the Institute of Artificial Intelligence Research and Development of Serbia.

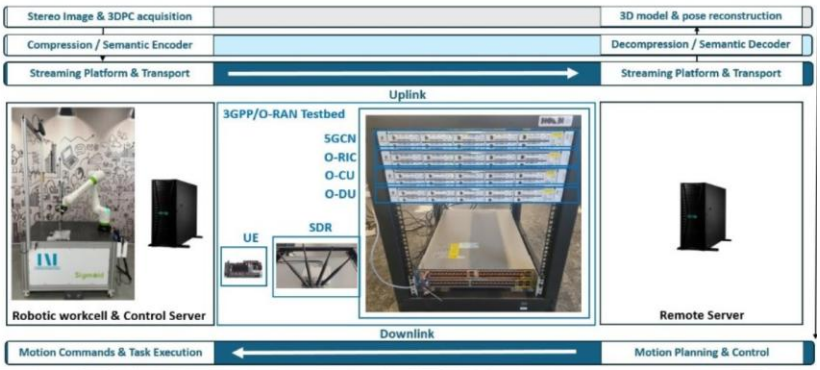
4. CONNECTED ROBOTICS: FROM COMMUNICATING DATA TO UNDERSTANDING THE WORLD

The ideas behind task-oriented communication become easier to understand when we look at real robotic systems. A robot may need to recognise an object, estimate its position, or build a map of the space in which it moves. In each case, its sensors generate much more information than is ultimately needed for a particular decision. As noted in the previous section, sending all this information over a wireless network can consume valuable bandwidth and introduce delays. But what if we could design the communication system around what the robot or the edge AI server assisting it actually needs to know?

Connected Robotic Workcell

Hardware and Sensors
- Robotic hand (Fanuc CRX 10)
- Camera: 3D point cloud + stereo RGB image

Edge AI
- AI model: 3D object and pose reconstruction
- Motion planning & control



Connected Edge SLAM

Hardware and Sensors
- UGV platform
- Wheel odometry, lidar, camera, **CSI data**

Edge AI
- Edge model: Factor Graph SLAM running Gaussian BP



Figure 3. Two representative 6G connected robotics use cases

Our research explores this question through two specific connected-robotics scenarios. The first concerns the transmission of three-dimensional information about objects in industrial environments. The second investigates how mobile robots can efficiently perform edge-based simultaneous localization and mapping (SLAM) while distributing their perception and localization tasks between the robot itself and nearby edge servers, while exploring how the wireless network can contribute as an additional sensing modality.

4.1 Semantic Communication of Point Clouds

In modern industrial environments, robots increasingly rely on depth cameras and other three-dimensional sensors to understand objects and their surroundings. These sensors can produce a point cloud: a collection of points representing the surfaces of objects in three-dimensional space. Point clouds can describe a scene in considerable detail, but transmitting them over a wireless network is demanding, particularly when the information must arrive quickly enough to support an ongoing robotic task.

Traditional compression approaches attempt to reduce the amount of data while preserving the geometry of the original point cloud as accurately as possible. This makes sense when the objective is to reconstruct or visualise an object. But consider a different situation: a robot receives information from a remote sensor because it needs to identify a component or determine whether a particular object is present. Does it really need every surface point to be reconstructed precisely? Or is it more important that the information arriving at the other end supports the correct decision?

These questions motivate our work on task-oriented wireless transmission of 3D point clouds. We are working towards developing a learning-based communication approach in which the transmitter converts a point cloud into a compact representation, which is sent over a simulated wireless channel and processed at the receiver. The system is designed to support two different objectives: reconstructing the object's geometry and recognising what the object is. This allows us to study how these objectives respond differently to imperfections in wireless transmission.

The experiments use data from an industrial setting, including the recognition of objects relevant for autonomous welding task. The results reveal an important behaviour. As the wireless channel deteriorates, the reconstructed geometry can become noticeably less accurate, while object recognition remains comparatively stable over a broad range of channel conditions. In other words, small errors in the reconstructed positions of individual points do not necessarily prevent a learning model from recognising the object correctly [14].

This finding illustrates one of the central ideas of semantic communication: the quality of a communication system should be judged not only by how accurately it reproduces the transmitted data, but also by how well it supports the task for which that data is needed. In an industrial application, the ability to make a reliable decision may matter more than reproducing every geometric detail.

There is an important qualification, however. Geometry still matters when a robot needs precise object dimensions, accurate positioning, or reliable manipulation. The goal is not to discard geometric information indiscriminately, but to understand which information must be preserved for a given task. A representation suitable for recognising an object may not be sufficient for grasping it. The challenge is to find the right balance between communication cost, robustness, and the requirements of the application.

4.2 Edge SLAM for 6G Connected Robotics

A second research scenario concerns mobile robots that continuously determine where they are and what their surroundings look like. This capability is known as simultaneous localisation and mapping, or SLAM. It allows a robot to estimate its position while building a map of an unfamiliar environment, using observations from sensors such as cameras, lidars and wheel odometry.

SLAM can require substantial computing power, particularly when it involves processing detailed lidar and camera images or combining several sources of information. A limited-compute mobile robotic platform cannot always perform every computation locally while meeting its performance and energy constraints. One option is to transfer some of the processing to a nearby edge server connected through

a 5G/6G network.
This arrangement introduces a challenge. The robot should send its sensor data across the network, the edge server must process it, and the resulting information should arrive in time to be useful. The wireless link is therefore not simply a transparent pipe between two endpoints: its latency, data rate, and behaviour affect the overall robotic system. Even the software mechanisms, such as widely used ROS2 middleware, that is used to package and transport sensor messages can influence end-to-end performance.
To investigate these interactions, our team has developed a connected mobile-robot platform integrating an unmanned ground vehicle, a 5G Open RAN testbed, and an edge server running a SLAM application. The platform allows us to examine and keep full observability of the complete path from the robot's sensors, through the robotic software and 5G network, to the computation performed at the edge. This makes it possible to investigate the system as a whole rather than studying the wireless link and the robotics software independently.
One part of this research focuses on a particularly interesting question: where should the processing take place? For example, instead of transmitting an entire camera image for every subsequent operation to be performed at the edge server, a learning-based visual-processing pipeline can be split between the robot and the edge computer. The robot performs an initial part of the computation and sends an intermediate representation to the edge, where the remaining processing is completed.
Recently, we have explored this idea for the detection of visual markers used to estimate the robot's position [15]. The learning model can be split at different points, changing how much computation takes place onboard and how much information must be transmitted. The intermediate representation is not intended to recreate the original image; it carries features needed for the remaining visual-processing task. The choice of split point therefore creates a trade-off between local computation, communication overhead, and the accuracy of the final localisation result, while the overall design goal is to minimize end-to-end latency while keeping the task performance at the satisfactory level. The communication system is no longer designed solely around the transmission of camera images. Instead, the transmitted information is tied to the computation that must be completed at the other end.
The same research platform opens the door to an even broader idea. A wireless network may do more than transport information between a robot and an edge server. The radio signals used for communication also interact with the surrounding environment, and measurements of these signals can contain information about that environment, as part of integrated sensing and communication paradigm. In particular, the wireless system can provide channel state information (CSI), which describes characteristics of the radio channel between the network and a connected device. Such measurements may complement information from cameras, odometry, and other sensors.
Our current work investigates how radio-channel information can be made available to the robot's SLAM application through the 5G Open RAN infrastructure. This is not simply a matter of switching on an existing feature: the radio measurements must be extracted from the network, delivered to the robotic software, and associated correctly with the robot's other sensor observations. We have developed and tested a mechanism for exposing CSI from the radio processing system to the edge application, while exploring an alternative based on the network's programmable control infrastructure. Using these measurements to improve the SLAM algorithm itself remains a further research step.
The longer-term vision is a more tightly integrated system in which the robot, edge server, and wireless network cooperate in understanding the environment. Rather than treating communication, computation, and sensing as separate functions, the system could exploit their interaction to support more capable and adaptable robots.

5. CONCLUSIONS: CONNECTING INTELLIGENT MACHINES

Is 6G going to be evolutionary or revolutionary? Perhaps the more useful question is what we expect future mobile networks to make possible. If 5G expanded the role of mobile networks from connecting people to connecting machines, 6G may take the next step towards connecting intelligent machines that must continuously perceive, reason, coordinate, and act in the physical world.
In this paper, we presented two examples that illustrate two complementary directions in our research. In the first, we investigate how to transmit information that preserves the properties needed for an industrial perception task, even when the wireless channel is imperfect. In the second, we explore how

to distribute robotic processing across the robot and the edge, and how information generated by the wireless network itself might contribute to environmental perception.

Both directions point beyond the traditional view of a mobile network as a system that simply delivers bits from one endpoint to another. For connected robotics, communication has to be considered alongside the computation and sensing that give those bits their purpose. The most useful information is not necessarily the most detailed, and the best place to process it is not necessarily on the robot or in the cloud alone.

These are still active research questions, rather than problems with universal solutions. Different robotic tasks demand different levels of geometric accuracy, latency, and robustness; wireless conditions and computing resources also change. The opportunity lies in designing these elements together, so that communication supports what the robot is trying to achieve.

This perspective brings us back to the broader question raised by the evolution towards 6G. If future networks are to support increasingly intelligent machines, success may depend not only on how much data they can carry, but also on how effectively they help those machines perceive, decide, and act.

ACKNOWLEDGEMENTS

This paper is based in part on the author's keynote presentation at the Global 6G Conference in April 2026 in Nanjing, China, and in part on the author's presentation at the panel entitled "Is 6G going to be evolutionary or revolutionary?" at the IEEE CSCN 2026 in London, UK. The author would like to thank colleagues from One6G WG2, work item WI216 on 6G connected robotics, and colleagues from IEEE P1955 standardization initiative on 6G connected robotics for insightful discussions. Finally and most importantly, the author would like to thank to the collaborators from research teams at the University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, and The Institute of Artificial Intelligence Research and Development, who contributed to the results described in this paper.

DECLARATIONS

Conflict of interest (mandatory): The authors declare no conflict of interest.

Data availability (mandatory): The data availability is not applicable.

Author contributions (mandatory): The sole author contributed to this paper.

Ethical approval (mandatory for research involving human participants, human data or animals): The ethical approval is not applicable.

REFERENCES

[1] M. Ghassemian, A. M. Valenzuela, A. G. Armada, D. Vukobratovic, P. Chatzimisios, K. Althofer, P. R. Venkatesh: "6G Empowering Future Robotics: A Vision for Next-Generation Autonomous Systems," to appear, IEEE Communication Magazine, 2026.

[2] G. Singh, S. Amatare, E. Natalizio, D. Roy: "Realizing the 6G-Enabled Industrial Internet of Robotic Things: Targets, Enablers, and a Case Study," to appear, IEEE Internet of Things Magazine, 2026.

[3] D. Gündüz, Z. Qin, I.E. Aguerri, H.S. Dhillon, Z. Yang, A. Yener, K.K. Wong, C.B. Chae, "Beyond transmitting bits: Context, semantics, and task-oriented communications," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 41, No. 1, pp. 5-41, 2022.

[4] L. Bariah, M. Debbah: "AI embodiment through 6G: Shaping the future of AGI," IEEE Wireless Communications, Vol. 31, No. 5, pp.174-181, 2024.

[5] A. Antonopoulos, E. Kartsakli, N. Bartzoudis, D. Brodimas, D. Vukobratovic, D. Tsolkas, F. Diego, G. Roumelas, L. Tomaszewski: "AGILE-6G: Agentic AI for autonomous management of 6G network/application services," to appear, IEEE Network, 2026.

[6] https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2030/pages/default.aspx (Accessed: 30.09.2026)

[7] X. Lin: "An overview of the 3GPP study on artificial intelligence for 5G new radio," arXiv preprint arXiv:2308.05315, 2023.

[8] P. Taksande, S. Kiran, P. Jha, P. Chaporkar: "AI/ML in 3GPP 5G Advanced: Services and Architecture," arXiv:2512.03728, 2026.

[9] C.E. Shannon: "A mathematical theory of communication," The Bell system technical journal, Vol. 27, No. 3, pp.379-423, 1948.

[10] Y. Shi, Y. Zhou, D. Wen, Y. Wu, C. Jiang, K.B. Letaief: "Task-oriented communications for 6G: Vision, principles, and technologies," IEEE Wireless Communications, Vol. 30, No. 3, pp.78-85, 2023.

[11] E. Bourtsoulatze, D.B. Kurka, D. Gündüz: "Deep joint source-channel coding for wireless image transmission," IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, Vol. 5, No. 3, pp. 567-579, 2023.
[12] V. Ninkovic, D. Vukobratovic, D. Miskovic, M. Zennaro: "COMMSPLIT: A Communication-Aware Split Learning Design for Heterogeneous IoT Platforms," IEEE Internet of Things Journal, Vol. 12, No. 5, pp. 5305-5319, March 2025.
[13] V. Ninkovic, D. Vukobratovic, D. Miskovic, C. Wang: "Adaptive Unequal Error Protection for Semantic Split Learning over Wireless Channels," to appear, IEEE Communication Letters, 2026.
[14] V. Ninkovic, T. Sobot, V. Vincan, G. Gojic, D. Miskovic, D. Vukobratovic: "Task-Oriented Wireless Transmission of 3D Point Clouds: Geometric Versus Semantic Robustness," In 2026 Global 6G Conference (Global 6G), pp. 1-6, Nanjing, China, April 2026.
[15] B. Radovanovic, V. Ninkovic, K. Vidojevic, B. Bajic Papuga, D. Vukobratovic: "A Semantic Communication Approach to Fiducial Marker Processing in 5G-Enabled Edge SLAM," In IEEE CSCN 2026, London, UK, September 2026, arXiv preprint arXiv:2608.09620.

AUTHOR BIOGRAPHIES



Dr Dejan Vukobratović received a PhD.degree in electrical engineering from University of Novi Sad, Serbia, in 2008, where he is currently a Full Professor. During 2009-2010, he was Marie Curie postdoctoral fellow at the University of Strathclyde, Glasgow, UK. He has published more than 60 journal papers and 120 conference papers in top-tier IEEE journals and conferences. He received a best paper award at IEEE MMSP 2010 and IEEE SmartGridComm 2017. He serves as an Associated Editor for IEEE Transactions on Communications. He was TPC Co-Chair of IEEE VTC Spring 2020 (Antwerp) and IEEE SmartGridComm 2022 (Singapore), Symposia Chair on IEEE SmartGridComm 2021 (Aachen) and IEEE ICC 2023 (Rome), and IEEE CSCN 2026 (London), and General Chair for BalkanCom 2021 (Novi Sad), IEEE CSCN 2024 and FCN 2025 (Belgrade). His research interests include wireless communications, signal processing, machine learning and information theory applied in mobile cellular systems (5G/6G) and IoT communications.

Упутство за ауторе

Упутство за ауторе и предложак за писање рада на српском језику је дат у наставку.

Instructions for Authors

Detailed instructions and a template for submitting an article in English are available on the following website: https://zbornik.ftn.uns.ac.rs

Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: (Уписује редакција, оставити овај ред)

ДОИ: (Уписује редакција, оставити овај ред)

Наслов рада на српском језику (не више од два реда)

Title of the Paper in English (Not More Than Two Lines)

Петар Петровић, Јован Јовановић, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – ВАШ СТУДИЈСКИ ПРОГРАМ

Кратак садржај – *Ово упутство за ауторе радова Зборника радова Факултета техничких наука треба да омогући уредан и једнообразан изглед објављених радова.*

Кључне речи (три до пет): *зборник, студентски радови, упутство*

Abstract – *These instructions for the authors in the Proceedings of the Faculty of Technical Sciences are intended to ensure a neat and uniform appearance of the published papers.*

Keywords: (three to five): *proceedings, student papers, instructions*

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Јован Јовановић, ред. проф.

1. УВОД

Кандидат пише рад у договору са ментором и уз његову помоћ. На изради рада могу да учествују и други сарадници или студенти, и они могу да буду коаутори, али само један кандидат може да брани мастер рад као аутор једног рада за Зборник радова ФТН-а (даље Зборник).

Ментор врши предају рада слањем рада Уређивачком одбору Зборника у *.docx* формату на имејл адресу zbornikftn@uns.ac.rs или zbornikftn@gmail.com. У истом имејлу ментор предлаже једног рецензета који је по правилу председник комисије или члан комисије за одбрану мастер рада. Због делотворније комуникације пожељно је да рецензент буде укључен у исти имејл. Рецензент доставља рецензију главном уреднику Зборника на поменуту имејл адресу, најкасније три дана по одбрани мастер рада.

Поступак је детаљно описан у упутствима доступним на веб-страници Зборника.

Рукопис рада за Зборник ограничен је на <u>најмање 4 странице проидржавајући се овог предлошка (шаблона), а максимално 5 страница</u>, укључујући слике, табеле, литературу, прилоге и друго. Снажна је препорука да послати рад садржи 4 странице.

Рад се пише на српском језику, ћириличним писмом коришћењем фонта *Times New Roman*. Рад је могуће написати и на енглеском језику, а за то је потребно да ментор пошаље захтев имејлом Уређивачком одбору Зборника бар 30 дана пре слања самог рада за Зборник. Главни уредник обавештава ментора да ли се предложени рад може објавити на енглеском језику. Предложак (шаблон) за писање рада на енглеском језику је дат у посебном документу и доступан је упитом Уређивачком одбору путем имејла.

Кандидат је у обавези да користи одговарајући предложак (на српском језику и ћириличном писму или енглеском језику) строго се придржавајући датих упутстава. На захтев Уређивачког одбора, аутор је посредством ментора дужан да изврши тражене исправке. У противном, објављивање рада, чак и ако је прелиминарно прихваћен за објављивање у Наставничком сервису, може бити одложено до испуњавања обавеза и тиме померена додела дипломе кандидата (аутора).

2. ФОРМАТИРАЊЕ И ПИСАЊЕ ТЕКСТА

За форматирање овог рада можете користити предефинисане стилова предложка. Коришћење стилова не гарантује потпуно усклађен рад са предложком Зборника, те је потребно детаљно прочитати ово упутство и упоредити рад са овим предложком.

На страницама рада, све четири маргине треба да буду по 2 цм. Не врши се означавање (нумерација) страна.

1. Форматирање текста

Рад треба да буде написан у два ступца (колоне) једнаке ширине, поравнате с горње стране, са размаком од 0,5 цм и бар приближно једнаке дужине са доње стране. Размак за наслове треба да буде 12 *pt before* и *after*, а за поднаслове 6 *pt before* и *after*.

1.1. Писање текста

На почетку (само) прве стране налази се Заглавље Зборника. После заглавља треба оставити два празна реда за накнадно уписивање УДК броја и ДОИ идентификатора. Ове податке уноси Уређивачки одбор Зборника у коначну верзију рада.

На средини прве странице рукописа написати пуномасним словима (*bold*) величине 14 наслов рада на српском језику (до два реда), а затим и наслов рада на енглеском језику. Испод наслова треба унети имена аутора и евентуалних коаутора, као и назив(е) њихових институција.

Ментор сам одлучује да ли ће он бити и коаутор рада. Ако ментор није коаутор, његово име се не спомиње на овом месту и његова биографија се не наводи на крају рада. Без обзира је ли ментор и коаутор рада, напомена о менторству је обавезна.

1.2. Писање израза, табела и подешавање слика

Математичке и друге операторе и величине које не узимају бројне вредности писати обичним словима, а величине које могу узимати бројне вредности – косим словима (*italic*).

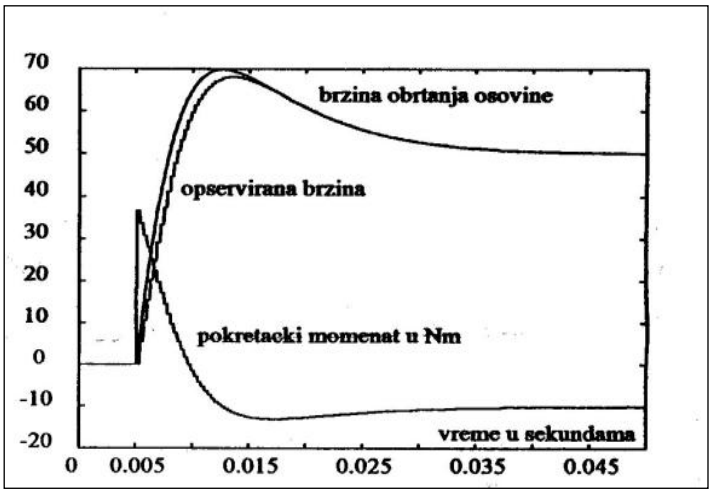
Дозвољена је употреба различитих едитора једначина, али се препоручују новији едитори, због квалитета коначне, штампане верзије текста. На пример, sin$x$, ln$x$(m), df(m)/dm, RC коло отпорности P=250 kΩ.

Математичке формуле треба да се означе (нумеришу) уз десну ивицу текста, као у примеру израза (1):

$$Q_i = log_2\left(\frac{1}{p_i}\right), \ \ i = 1 \ldots M \qquad (1)$$

Ако је потребно укључивање великих слика, једначина или табела, ради побољшања њихове прегледности или читљивости, може да се формира посебна секција, са једном колоном, потребне висине и ширине, са бочним маргинама ширине 2 цм. У ту секцију уноси се нпр. слика и њен назив.

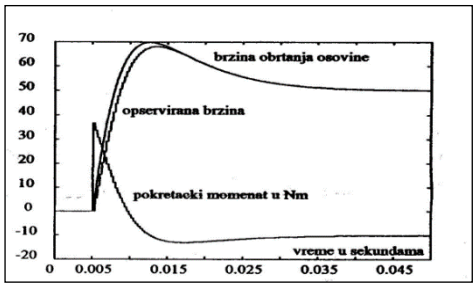
Изнад табеле треба да стоји натпис, као у Табели 1. Испод сваке слике или дијаграма треба да стоји број и кратак назив, а свака слика и табела мора да се помену у тексту. Ако нема простора за слику на истој страни или колони где је поменута, треба да се стави на следећу страну или колону.



Слика 1. Резултати симулације [2]

Табела 1. Врсте система за обраду сигнала

	Линеарни	Нелинеарни
Без меморије	Појачавачи	Нелинарни системи
Са меморијом	Филтри [2]	не разматрамо их



Слика 2. Исти пример слике са мањим димензијама [3]

На крају рада даје се кратка биографија аутора (фонт величине 9) и пожељно прилаже слика.

Избегавати колико је могуће линкове на веб странице као референце.

Литература која садржи доминантно такве линкове, посебно на веб странице непровереног научног и/или стручног садржаја је неприхватљива.

За квалитет и веродостојност резултата одговорни су ментор и аутори.

Референцирање литературе ради се према IEEE Citation Style [3,4]. Радови треба да буду побројани на крају рада, треба да буду означени (нумерисани бројевима) у углатој загради, по редоследу референцирања, као у овом упутству, односно као у [3]. На месту референцирања, бројеви у загради треба да буду уписани унутар реченице [3] или на крају реченице [2,3,4] или као [2-4]. Ако се број ставља на крају реченице, мора да буде уписан унутар реченице [4]. Дакле, никако. [4]

Такође, заграда са бројем мора да буде одвојена од текста [2] а никако[2].

Исто правило о цитирању важи и за све слике које су преузете из литературе, као нпр. у називу слика 1. и 2.

Сва литература наведена на крају текста мора да буде цитирана. Не треба копирати цео списак литературе из мастер рада, ако се само неки од тих наслова цитирају у овом раду.

2. ЗАКЉУЧАК

Драги Аутори (Мастеранти) и Ментори, у заједничком је интересу да поштујемо наведена упутства како би читав поступак прихватања рада у Зборнику, одбрана мастер рада, објављивање рада и дипломирање било урађено правовремено и делотворно.

Радујемо се успешној сарадњи и новим мастер дипломама.

3. ЛИТЕРАТУРА

[1] V.I. Utkin, “Variable structure control systems with sliding modes”, *IEEE Trans. Automat. Control*, Vol. AC-22, pp. 210-222, April 1977.

[2] A.E. Bryson, Y.C. Ho, *“Applied Optimal Control”*, New York, Wiley, 1975.

[3] http://pitt.libguides.com/citationhelp/ieee (pristupljeno u martu 2018.)

Кратка биографија:

Фотографија аутора (пожељно) *Width* 2.5cm; *Height*: *auto* (*lock aspect ratio*) Резолуција: минимум *300 dpi*	**Петар Петровић** рођен је у Новом Саду 1994. год. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Електротехнике и рачунарства – Енергетска електроника и електричне машине одбранио је 2018.год. **Контакт**: mail.adresa@gmail.com **(обавезно)**