

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај о урађеној докторској дисертацији кандидата Алексе Миладиновића

Одлуком бр. 2026-35/369 од 27. августа 2026. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену докторске дисертације кандидата Алексе Миладиновића под насловом „Моделовање и оптимизација електрификације енергане у индустријским постројењима”.

После прегледа достављене дисертације и другог пратећег материјала, као и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Школске 2022/2023. године кандидат Алекса Миладиновић је уписао докторске академске студије на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду, на студијском програму Хемијско инжењерство.

24. април 2025. – На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду, донета је одлука број 2025-35/86 о именовању Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације Алексе Миладиновића под називом „Моделовање и оптимизација електрификације енергане у индустријским постројењима”.

27. мај 2025. – На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду, донета је одлука број 2025-35/116 о прихватању извештаја Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Алексе Миладиновића под називом „Моделовање и оптимизација електрификације енергане у индустријским постројењима”. За ментора ове докторске дисертације именован је др Мирко Стијеповић, редовни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду.

4. јул 2025. – На седници Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду донета је одлука број 06-3002/8-25 о давању сагласности на предлог теме докторске дисертације Алексе Миладиновића, под називом: „Моделовање и оптимизација електрификације енергане у индустријским постројењима”.

27. август 2026. – Одлуком број 2026-35/369, на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду, именована је Комисија за оцену докторске дисертације Алексе Миладиновића, под називом: „Моделовање и оптимизација електрификације енергане у индустријским постројењима”.

1.2. Научна област дисертације

Истраживања у оквиру ове докторске дисертације припадају научној области Техничко-технолошких наука, научној грани Хемијско инжењерство, за коју је Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду матична установа. Ментор, др Мирко Стијеповић, редовни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду, на основу досадашњег

научноистраживачког рада и броја објављених радова испуњава све неопходне услове да руководи изразом ове докторске дисертације.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Алекса Миладиновић, мастер инжењер технологије, рођен је у Београду 24. 06. 1997. године. Основну и средњу школу завршио је у Београду са одличним успехом. Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду уписао је 2016. године на студијском програму Хемијско инжењерство, изборном подручју Органска хемијска технологија, и дипломирао у фебруару 2021. године на тему „Симулација процеса хидродесулфуризације фракције бензина“. Током основних студија на првој години, био је добитник награде „Панта С. Тутунџић“ за изузетан успех и просек 9,00. Мастер академске студије на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду уписао је 2021. године на студијском програму Хемијско инжењерство и завршио 2022. године са темом „Симулација и нумеричка анализа пиролитичке пећи у процесу производње етилена“, са просеком 9,25. Докторске студије на матичном факултету, на студијском програму Хемијско инжењерство, уписао је школске 2022/23. године. Испите на докторским студијама је положио са просечном оценом 9,70. Од 01. априла 2023. запослен је у Центру за материјале и металургију (ЦММ) Института за хемију, технологију и металургију (ИХТМ) у Београду.

Кандидат поседује повељу Друштва за процесну технику Савеза машинских и електротехничких инжењера и техничара Србије за најбољи мастер рад у школској 2022/2023. години. Такође је учествовао у изради елабората о стручној анализи рада енергетског система фабрике „Етилен“ и предлогу мера за унапређење ефикасности. У оквиру програма SEED Research Grant 2025 одобрена му је реализација интерног пројекта „SEED“ под називом „Hybrid Modeling of a Low-Energy, Eco-Friendly Membrane Separation System at the Laboratory Scale (HELMS)“ на коме је био руководилац.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Алексе Миладиновића под називом: „Моделовање и оптимизација електрификације енергане у индустријским постројењима“ написана је на 195 нумерисаних страна, у оквиру којих се налази 58 слика, 22 табеле и 113 литературних навода. Докторска дисертација садржи следећа поглавља: Увод, Анализу досадашњих истраживања, Методолошки оквир, Студије случаја и анализу резултата, Дискусију резултата, Закључак и Литературу. Поред тога, дисертација садржи Резиме на српском и енглеском језику, Списак симбола и ознака, Списак слика, Списак табела и Садржај. На крају дисертације дата је Биографија кандидата, као и Изјава о ауторству, Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада, Изјава о коришћењу и Оцена извештаја о провери оригиналности докторске дисертације. По својој форми и садржају, рад задовољава прописане стандарде Универзитета у Београду за докторску дисертацију.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У поглављу Увод дат је концептуални оквир и објашњен проблем глобалног загревања, уз посебан осврт на значај декарбонизације као кључног механизма за постизање одрживог развоја. Наведене су водеће индустријске мере декарбонизације, попут повећања енергетске ефикасности, електрификације процеса, замене фосилних горива обновљивим изворима енергије и развоја циркуларне економије. Посебна пажња је посвећена производњи етилена, као једном од главних извора CO₂ у петрохемијској индустрији. Резултати студије животног циклуса указују да примена електричног крековања, уз коришћење обновљивих извора енергије, омогућава значајно смањење угљеничног отиска у односу на конвенционална технолошка решења. Анализа је обухватила и производњу челика, са нагласком на технолошке потенцијале за редукцију укупног угљеничног отиска. С обзиром на изузетну сложеност ових савремених технологија, указује се на неопходност примене математичког моделовања у анализи и оптимизацији енергетски интензивних индустријских система. Као водећи методолошки приступ издваја се Мешовито-целобројно линеарно програмирање (MILP), које омогућава симултано решавање проблема конфигурације система и оперативног управљања, као и динамичко моделовање сложених прелазних стања у раду постројења.

Поред традиционалних детерминистичких модела који захтевају темељно познавање термодинамичких закона, анализира се и примена вештачких неуронских мрежа како би се комбиновањем ова два приступа оформио хибридни модел. На крају поглавља, истиче се да је применљивост предложених MILP и хибридног модела успешно потврђена њиховом имплементацијом на реалне енергетске системе (енергане) у комплексним постројењима за производњу етилена и челика.

У другом поглављу дисертације, Анализи досадашњих истраживања, дат је свеобухватан критички преглед научне литературе и савремених научних достигнућа у области моделовања и оптимизације индустријских енергана. Кроз детаљну анализу релевантних научних извора, ово поглавље идентификује тренутно стање технике, кључне методолошке изазове и простор за научни допринос дисертације. Први део поглавља фокусиран је на кораке у моделовању и оптимизацији компресорских система и рада турбина, као виталних компоненти за трансформацију и пренос енергије у процесној индустрији. Надаље, детаљно се анализирају индустријски системи паре, где су детаљно приказани постојећи математички модели појединачних компоненти, као и различити приступи њиховој оперативној оптимизацији (за постојећа постројења) и структурној и параметарској оптимизацији (за пројектовање нових система). Посебан методолошки осврт дат је на савремене концепте управљања неизвесношћу у оптимизацији, што је кључно за стабилан рад реалних система у условима динамичких промена. На крају, поглавље анализира развој и примену хибридних модела, са нагласком на синергију између традиционалних детерминистичких модела („белих кутија“) и вештачких неуронских мрежа („црних кутија“). Овај преглед служи као научна основа за развој напредних оптимизационих модела који се предлажу у оквиру ове докторске дисертације.

Треће поглавље дисертације, Методолошки оквир, представља кључни методолошки допринос рада кроз развој и имплементацију математичких модела за оптимизацију индустријских енергана. На почетку поглавља дат је детаљан технички приказ реалне индустријске енергане, који служи као инжењерска и методолошка основа за развој целокупног модела. Математички оквир се заснива на изградњи напредне „суперструктуре“ и примени хибридног моделовања. Унутар овог оквира дефинисан је детерминистички модел који захтева дубоко познавање физичко-хемијских и термодинамичких закона појединачних подсистема, као и модел вештачких неуронских мрежа који функционише по принципу „црне кутије“ на бази велике количине процесираних података. Описани су појединачни математички модели уређаја у систему енергане, након чега је извршена валидација модела и дефинисана стратегија рационализације читавог система. У наставку, поглавље се фокусира на оперативну оптимизацију рада енергане, детаљно описујући кључне технолошке компоненте у оквиру електрификованог индустријског система. Као примарни математички алат имплементиран је напредни модел Мешовито-целобројног линеарног програмирања (MILP), који симултано решава проблеме конфигурације система и оперативног управљања. Овај модел успешно дефинише сложена прелазна стања постројења (попут покретања и заустављања погона) као и брзо реаговање на промене цена електричне енергије на тржишту. Описана је комплетна методологија имплементације и развоја суперструктуре на реалне енергетске системе у сложеним индустријским постројењима за производњу етилена и челика. На крају поглавља приказани су коришћени инжењерски алати и дефинисани стандарди за израду и организацију пратеће документације која омогућава практичну примену развијених модела.

У поглављу Студије случаја и анализа резултата су развијени математички модели примењени на конкретне индустријске системе енергана кроз низ студија случаја. На тај начин је изведена валидација наведених модела и дат приказ ефикасности модела у решавању два кључна изазова савремене процесне индустрије: смањења емисије угљен-диоксида и повећања енергетске ефикасности. Студије случаја су конципиране тако да обухвате најинтензивније индустријске секторе, попут петрохемијске и индустрије челика. Прва студија случаја обухвата челичану у којој увођење електричних уређаја има за циљ знатно смањење емисије CO₂. Затим се анализирају перформансе кључних енергетских јединица у парним системима за производњу етилена, пре свега компресорских система покретаних парним турбинама (SDMCS) ради одређивања главних извора губитака и деградације опреме. Потом се интегрисаном оптимизацијом параметара енергане, уз увођење технологија заснованих на обновљивим изворима енергије, целокупна инфраструктура трансформише у одрживо решење које је отпорно на флукуације цена фосилних горива и таксе на CO₂. Такође је примењена методологија која омогућава дефинисање адекватног броја парних водова у системима паре, уз смањење укупних трошкова.

Анализира се улога котлова на отпадну топлоту (HRSG) у контексту рекуперације топлоте, што ће показати да интегрисани системи постају кључни за одрживост при високим тржишним ценама енергије. Истражена је економска одрживост предложених решења оптимизације рада енергана у условима променљивих цена енергената и такси на CO₂ применом хибридног приступа, који комбинује детерминистички модел и вештачке неуронске мреже (ANN) ради постизања максималне прецизности. Овако структуриран приступ омогућава прелазак са теоријских модела на практично применљиве стратегије.

У поглављу Дискусија резултата су детаљно анализирани резултати добијени кроз различите фазе истраживања, од термодинамичке процене деградације појединачних компоненти енергана, преко оптимизације структуре мреже, до примене напредних хибридних модела. У том смислу, почетни део дискусије доноси детаљну процену перформанси и анализу деградације вишестепених компресорских система повезаних на парне турбине (SDMSCS), чиме се дефинишу практичне границе за њихов стабилан и сигуран рад. Даље, пажња се усмерава на оптимизацију конфигурације и оперативног рада индустријских енергана, анализирајући методолошки прелазак са класичне процесне интеграције на савремене хибридне енергетске системе. Кроз призму декарбонизације, вреднује се економска оправданост увођења MILP оптимизације, као и техно-економска изводљивост интеграције обновљивих извора на примеру индустрије челика. Такође, разматрају се ефекти структурне оптимизације дистрибутивне мреже паре (путем дефинисања нивоа притиска и конфигурације размењивача топлоте), као и практични допринос примене хибридног модела у реалним тржишним условима. Добијени резултати потврђују широку применљивост предложене методологије за трансформацију традиционалних енергана у електрификоване и декарбонизоване системе.

У поглављу Закључак систематизовани су кључни научни и практични исходи докторске дисертације, уз јасно дефинисање постигнутог доприноса у области декарбонизације и оптимизације индустријских енергетских система. Полазећи од анализе ефикасности и утврђене деградације вишестепених компресорских система, истраживање се методолошки развија ка примени MILP модела за оперативну оптимизацију и електрификацију, чиме је дефинисана нелинеарна веза трошкова и редукције CO₂ уз идентификовање критичне превојне тачке. Пратеће техно-економске и анализе животног циклуса су потврдиле да је потпуна електрификација на бази енергије ветра еколошки и финансијски најодрживији ослонац ове транзиције. Даљом структурном оптимизацијом мреже паре дефинисан је оптималан системски компромис између капиталних трошкова и сложености постројења кроз оптимизацију броја парних водова. Коначно, методологија је заокружена хибридним моделом (термодинамика у спрези са вештачким неуронским мрежама) који превазилази проблем недостатка мерених података у реалном времену, осигурава прецизно предвиђање перформанси турбина и доказује да електрификација служи као кључни стратешки механизам за ублажавање ризика од флукуација цена фосилних горива на тржишту.

У оквиру поглавља Литература приказан је свеобухватан и систематизован преглед релевантних научних и стручних извора цитираних у докторској дисертацији, који чине теоријску и методолошку основу спроведеног истраживања. Ова библиографска база обухвата водеће референтне радове из области математичког моделовања и оптимизације индустријских енергана, оперативне и структурне оптимизације помоћу MILP модела, као и развоја напредних хибридних модела у спрези са вештачким неуронским мрежама. Посебан сегмент литературе чине студије посвећене декарбонизацији процесне индустрије, анализи животног циклуса (LCA) обновљивих извора енергије, те техничким аспектима у домену перформанси вишестепених компресорских система и парних турбина у индустрији етилена и челика. Пажљиво одабрани цитирани извори омогућавају критичко сагледавање актуелног стања у научној заједници и јасно позиционирање оствареног научног доприноса ове дисертације у глобалним оквирима.

Дисертација садржи и Биографију кандидата, Изјаву о ауторству, Изјаву о истоветности штампане и електронске верзије, Изјаву о коришћењу и Оцену извештаја о провери оригиналности докторске дисертације.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Савременост истраживања директно произилази из актуелних глобалних изазова индустријске декарбонизације, енергетске транзиције и дигитализације великих процесних постројења у условима све строжијих еколошких регулатива и нестабилности тржишта енергената. Традиционални индустријски системи паре представљају неке од најинтензивнијих потрошача фосилних горива, те њихова техничка трансформација захтева развој напредних, динамичких модела који превазилазе статичке и локално ограничене анализе.

Оригиналноост дисертације почива на четири кључна доприноса који представљају значајан искорак у поређењу са постојећим научно-стручним решењима у области процесног инжењерства:

- 1) оригинална детерминистичка процедура за процену перформанси вишестепеног компресорског система повезаног на парну турбину (SDMSCS) енергане: Насупрот досадашњем изолованом моделовању компоненти система паре, развијен је методолошки приступ заснован на термодинамички утемељеним обрасцима повезивања (блоковима моделовања) који по први пут истовремено повезују рад парне турбине и вишестепеног компресора у реалном времену. Оригиналноост се огледа у математичком дефинисању термодинамичких губитака и механичке деградације кроз политропску и механичку ефикасност компресорских система независно од врсте радног флуида. Резултати овог приступа омогућавају формулацију проблема оптимизације целокупног система паре у оквиру мешовито-целобројног линеарног програмирања (MILP).
- 2) примена систематичне MILP методологије у техно-економској оптимизацији енергане:
 - а) У циљу декарбонизације и повећања ефикасности система паре у енерганама разматрана је оптимизација различитих конфигурација система у којима је изведена замена конвенционалних уређаја на фосилна горива уређајима који користе електричну енергију и водоник. Ретрофит система паре, који подразумева интеграцију електричних котлова, прегрејача и котлова на водоник кроз три различите конфигурације, показао се технички изводљивим уз значајно смањење емисије угљен-диоксида. Конфигурација са комплетном електрификацијом омогућава потпуну декарбонизацију. Ова конфигурација, иако захтева значајна почетна улагања, резултира најнижом потрошњом енергије захваљујући високој ефикасности електричне опреме. Веза између укупних трошкова енергане и смањења емисије CO_2 има нелинеаран карактер. Одређена је критична превојна тачка при смањењу емисије на приближно 8 t/h, када укупни трошкови достижу максимум, што указује на постојање „хибридне зоне“ у којој је делимична електрификација економски најнеповољнија. Водоник се показао као кључна алтернатива која обезбеђује стабилне оперативне трошкове. Утврђено је да уколико цена електричне енергије пређе праг од 3,25 \$/kWh, систем преусмерава оптерећење са електричних на водоничне котлове како би се обезбедила економска одрживост. Високе стопе пореза на угљен-диоксид чине традиционалне конфигурације на природни гас потпуно неодрживим, услед чега електрификација постаје примарни механизам за очување профитабилности постројења.
 - б) Развијен је оригинални оптимизациони модел парних водова различитих температура заснован на MILP методологији. Превођењем комплексних нелинеарних термодинамичких интеракција у линеарни облик омогућено је проналажење оптималне конфигурације енергане. Тако се постиже равнотежа између сложености система паре и укупних трошкова, за нове и постојеће индустријске конфигурације. Применом MILP модела на енергану фабрике етилена утврђено је да оптималан број парних водова износи 21–23, изнад чега оперативни трошкови нагло расту. Одређен је и праг економске осетљивости на нивоу цене електричне енергије од 0,0275 €/kWh. Испод овог прага доминирају капитални трошкови, а изнад оперативни трошкови. Такође раст цене електричне енергије са 0,01 на 0,113 €/kWh економски оправдава повећање степена рекуперације топлоте у HRSГ котлу са 23 % на 47 %, нарочито изнад прага од 0,05 €/kWh.
- 3) развијен хибридни оквир који спаја детерминистички приступ и неуронску мрежу: Да би се превазишао практичан проблем у индустрији који представља недостатак мерних података,

формулисан је модел који комбинује термодинамичке законе са вештачким неуронским мрежама (ANN), успешно процењујући нелинеарне излазе на местима без мерне опреме. Главна предност овог приступа лежи у високој прецизности предвиђања уз минималну количину података потребних за обуку неуронске мреже.

- 4) разматрана замена фосилних горива обновљивим изворима енергије на постројењу производње челика: Иако енергија ветра, концентрисана соларна енергија (CSP) и фотонапонски системи (PV) остварују идентично оперативно смањење емисија, спроведена анализа животног циклуса (LCA) показује да ветар (11 g CO₂/kWh) представља најефикасније, а фотонапонски системи (48 g CO₂/kWh) најмање повољно решење. Са економског аспекта, енергија ветра се показала као стабилнија и повољнија опција, уз изједначену цену електричне енергије (LCOE) од 0,051 до 0,067 USD/kWh, у поређењу са фотонапонским системима код којих та цена износи од 0,078 до 0,111 USD/kWh. Резултати су показали да хибридизација природним гасом, иако краткорочно смањује LCOE, дугорочно угрожава остваривање циљева декарбонизације. Као оптимална стратегија издвојила се потпуна електрификација заснована на енергији ветра уз коришћење система за складиштење енергије. Овај приступ остварује најнижи LCOE (0,026 USD/kWh) и највеће нето смањење емисија, чиме се обезбеђују економска одрживост и отпорност на тржишне осцилације. Оригинални научни допринос овог дела истраживања се огледа у раздвајању оперативног од стварног нето смањења емисија применом методологије анализе животног циклуса (LCA). Тиме је по први пут за овакву врсту постројења доказано да занемаривање уграђених емисија, насталих током производње и транспорта опреме, води до погрешне процене њиховог стварног еколошког утицаја.

Успешна имплементација и експериментална верификација развијених модела на реалним сложеним постројењима из потпуно различитих индустријских грана потврђују да се предложени модели могу применити и на друге енергетски интензивне процесе, не само на разматране случајеве.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У дисертацији је коришћено 113 литературних навода (укључујући референце које је кандидат објавио), који у потпуности одговарају предмету истраживања, научно утемељују предложену методологију и указују на њену изузетну актуелност. Систематски преглед научне литературе са SCI листе омогућио је груписање извора у кључне методолошке домene дисертације: оперативну оптимизацију и декарбонизацију система паре помоћу MILP модела, развој хибридних модела који укључују вештачке неуронске мреже (ANN) за превазилажење проблема недостатка процесне мерне опреме, процену животног циклуса (LCA) и техно-економске одрживости обновљивих извора енергије у индустрији, као и термодинамичку дијагностику рада и деградације индустријских компресорских постројења. Већина цитираних радова је новијег датума, док одабране старије публикације пружају неопходна фундаментална термодинамичка сазнања. Објављени радови кандидата потврђују континуитет истраживања, при чему је целокупна библиографска база послужила као чврст научни ослонац за поставку, валидацију и економску анализу развијених модела.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У дисертацији је примењен системски приступ који интегрише термодинамичко моделовање, машинско учење и техно-економску оптимизацију, а чија је поузданост потврђена реалним оперативним подацима. Развијен је термодинамички модел заснован на утемељеним обрасцима повезивања (блоковима моделовања), који омогућава истовремену процену термодинамичке деградације и механичких губитака у реалном времену, независно од врсте радног флуида. Формулисан је оптимизациони модел заснован на суперструктури енергане, који линеаризује нелинеарне термодинамичке функције. Предложени приступ претвара сложен проблем у линеаран, што обезбеђује брзо проналажење глобалног оптимума при симултаном минимизацији капиталних и оперативних трошкова енергане. Ради решавања проблема непотпуне инструментације у реалном времену, интегрисани су биланси масе и енергије парног котла са вишеслојном директном вештачком неуронском мрежом обученом помоћу Levenberg–Marquardt алгоритма, чиме је омогућено прецизно предвиђање снаге три парне турбине у енергани. Вишекритеријумска оптимизација укупних трошкова

и емисије CO₂ је спроведена применом а posteriori ϵ -constraint методе, чиме су генерисани Парето скупови решења за објективну анализу технолошких алтернатива. Интеграција обновљивих извора енергије (енергија ветра, фотонапонска енергија и концентрисана соларна енергија) је изражена кроз изједначену цену производње електричне енергије и анализу фактора емисије током животног циклуса процеса.

Адекватност примењених метода је научно верификована кроз слагање модела са реалним подацима. Хибридни модел је показао изузетну прецизност са максималном апсолутном процентуалном грешком (MAPE) испод 0,5 % за све излазне променљиве. Детерминистички модел SDMSCS је репродуковао перформансе опреме у оптималном стању са одступањем од свега 1,4–4 %, док је код деградираних компресорских система прецизно уочио реални пад механичке ефикасности са 97 % на 92,4 %. Наведени резултати потврђују научну заснованост и практичну применљивост предложене методологије, чиме су развијени модели оспособљени за примену у предиктивном одржавању и оптимизацији енергане.

3.4. Применљивост остварених резултата

Практична применљивост развијених математичких модела приказаних у дисертацији превазилази оквире појединачних студија случаја и обухвата широк спектар енергетски интензивних индустријских постројења, са посебним фокусом на петрохемијски и металуршки сектор. Развијена универзална детерминистичка процедура за процену перформанси сложених вишестепених компресорских система покретаних парним турбинама у реалном времену омогућава инжењерима симултану процену термодинамичких и механичких деградација, те се може применити на слична постројења која користе ротациону опрему без обзира на врсту флуида или специфичан индустријски процес. Систематична MILP оптимизациона методологија за идентификацију и избор оптималних притисака и температура у парним нивоима енергане представља напредни математички алат који је подједнако применљив како за пројектовање потпуно нових енергана, тако и за реконструкцију и модернизацију постојећих у циљу транзиције ка раду са ниским емисијама CO₂. Даље, успостављени хибридни оквир који спаја фундаменталне термодинамичке принципе и вештачке неуронске мреже нуди ефикасно методолошко решење за превазилажење практичног проблема недостатка мерних података код великих индустријских постројења, омогућавајући прецизно вођење процеса и предвиђање потрошње горива. Коначно, предложени математички модел декарбонизације путем постепене електрификације, примене водоничних технологија и интеграције обновљивих извора енергије је важан стратешки инструмент за техно-економску оптимизацију енергане, омогућавајући доношење оптималних инвестиционих одлука у условима флукуација цена енергената на тржишту и динамичног поопштравања регулаторних механизма при опорезивању емисије CO₂.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Алекса Миладиновић је током израде докторске дисертације показао стручност и способност у примени различитих техника моделовања, као и у детаљној анализи и интерпретацији добијених резултата. Комисија сматра да кандидат Алекса Миладиновић, квалитетом остварених научних резултата, као и својим ангажовањем у научноистраживачком раду током израде ове докторске дисертације, поседује све квалитете неопходне за самосталан научноистраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

- Успостављен је универзални детерминистички поступак за процену перформанси сложених вишестепених компресорских система покретаних парним турбинама (SDMSCS) у реалном времену..
- Формулисана је систематична методологија заснована на моделу Мешовито-целобројног линеарног програмирања (MILP) за оптимизацију енергане и избор оптималних нивое паре..

- Развијен је хибридни методолошки оквир који повезује детерминистичке термодинамичке моделе и вештачке неуронске мреже.
- Развијена је процедура за декарбонизацију индустријских енергана кроз постепену електрификацију, увођење електричних и водоничних уређаја и интеграцију обновљивих извора енергије.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Декарбонизација индустријских процеса представља један од кључних изазова савремене енергетске транзиције, с обзиром на то да енергетски интензивне гране, попут производње челика и петрохемијских производа, чине значајан удео глобалних емисија CO_2 . Таква транзиција ипак захтева поуздане алате за анализу и оптимизацију термодинамичких перформанси индустријских система. Досадашњи термодинамички модели су најчешће били или сувише специфични (везани за тачно одређени радни флуид или индустријско постројење) или су посматрали систем као „црну кутију“, без могућности да изолују деградацију појединих елемената. Увођењем концепта блокова моделовања ови недостаци су превазиђени, чиме је остварена универзалност приступа. Модел омогућава анализу било које конфигурације (са рециклима, сепараторима, вишестепеним компресорима, турбинама итд.) независно од радног флуида, при чему се у реалном времену симултано раздваја деградација појединачних јединица од ефикасности целог енергетског система.

Избор броја и притисака парних нивоа се традиционално ослањао на практична искуства, парцијалне анализе или методе пробе и грешке, што ретко доводи до оптималне уштеде трошкова и смањења емисија CO_2 . Преласком на математички оптимизациони оквир заснован на Мешовито-целобројном линеарном програмирању (MILP), који комбинује непрекидне и целобројне променљиве и омогућава проналажење глобалног оптимума, створена је могућност проналажења оптималне равнотеже између капиталних и оперативних трошкова. Сечено научно знање омогућава пројектовање нових енергана, а не само анализу параметара постојећих.

Детерминистички модели захтевају прецизне улазне податке који у пракси нису увек доступни у индустријским постројењима, док модели вештачке интелигенције функционишу као затворени системи, без осигуране тачности. Развојем хибридног методолошког оквира спојена је физичка утемељеност детерминистичких модела са способношћу неуронских мрежа да смање одступања и компензују непотпуност података. Ово показује да се термодинамички приступ може успешно применити у пракси чак и када мерна опрема није у потпуности доступна.

Постојећи модели декарбонизације најчешће занемарују симултано разматрање тржишних променљивих, попут флукуација пореза на CO_2 и цена електричне енергије и водоника. Предложени MILP оптимизациони модел уводи концепт прагова осетљивости и тачака у којима прелазак са фосилних, на технологије са ниском емисијом угљен-диоксида постаје економски оправдан. Утврђено је да цена електричне енергије од 3,25 \$/kWh представља критичну тачку изнад које уређаји на водоник постају исплативија алтернатива електричним котловима. Резултати потврђују да сценарио са потпуном електрификацијом остварује најнижу укупну потрошњу енергије, чиме се приказује термодинамичка и оперативна предност електричне опреме у односу на конвенционалне системе.

Иако енергија ветра, узимајући у обзир и складиштење, остварује најнижу просечну (изједначену) цену производње електричне енергије по киловат-часу (LCOE), њена примена захтева знатно већу просторну површину у односу на фотонапонске (PV) и концентрисане соларне (CSP) системе, што представља значајно просторно и логистичко ограничење. Иако замена природног гаса обновљивим изворима енергије привидно пружа идентично смањење емисија CO_2 за све посматране технологије, тек анализа животног циклуса (LCA) открива да ветар остварује највеће нето смањење емисија услед најнижег фактора уграђених емисија. Допуна ветроенергетског система природним гасом снижава LCOE, али директно угрожава циљеве декарбонизације. Оловне батерије, иако кључне за стабилност мреже, због високе цене и ограничене ефикасности доводе у питање економску одрживост читавог система. Ово указује на ограничења постојећих модела одлучивања који се ослањају претежно на LCOE, те наглашава важност интегрисаног приступа који обједињује економске, просторне и еколошке факторе приликом избора извора енергије.

4.3. Верификација научних доприноса

Из истраживања у оквиру ове докторске дисертације кандидат Алекса Миладиновић је публиковао више научних радова: један рад у врхунском међународном часопису категорије M21a, један рад у врхунском међународном часопису категорије M21 и један рад у међународном часопису категорије M23.

Категорија M21a:

1. Miladinović A., Stajić - Trošić J., Kijevčanin M., Stijepović V., Alnouri S., Stijepović M. (2025) Performance Estimation of a Steam-Turbine Driven Multistage Compressor System. *Case Studies in Thermal Engineering*, 74, 106764. (IF=6,6) (ISSN: 2214-157X), (<https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106764>)

Категорија M21:

1. Miladinović A., Grujić A., Kijevčanin M., Stijepović V., Alnouri S., Stijepović M. (2025). Towards Zero Carbon Emissions: Electrification and Decarbonization of an Ethylene Plant's Utility System. *Computers and Chemical Engineering*, 198, 109117. (IF=4,9) (ISSN: 0098-1354) (<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2025.109117>)

Категорија M23:

1. Miladinović A., Kijevčanin M., Jovanović J., Alnouri S., Stijepović V., Stijepović M. (2026). Optimizing ethylene plant utilities via hybrid ANN and first-principles modelling. *Journal of the Serbian Chemical Society*, **91**(3), 291-302. (IF=0,8) (ISSN: 0352-5139) (<https://doi.org/10.2298/JSC250917090M>)

5. ПРОВЕРА ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

На основу Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду (Гласник Универзитета у Београду, бр. 204 од 22. јуна 2018. године), коришћењем програма iThenticate 31. августа 2026. године извршена је провера оригиналности докторске дисертације кандидата Алексе Миладиновића под називом „Моделовање и оптимизација електрификације енергане у индустријским постројењима”.

Утврђено је да подударање текста износи 2 %. Овај степен подударности је последица употребе стручних термина специфичних за област којој припада дисертација, назива модела и објашњења појмова који се налазе у дисертацији. Највећи проценат подударности се односи на претходно објављене резултате истраживања кандидата, који су проистекли из његове дисертације, што је у складу са чланом 9. Правилника.

На основу свега изложеног Комисија сматра да је докторска дисертација кандидата Алексе Миладиновића оригинална, као и да су у потпуности поштована академска правила цитирања, те се прописани поступак припреме за њену одбрану може наставити.

6. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу свега наведеног Комисија сматра да докторска дисертација кандидата Алексе Миладиновића, мастер инжењера технологије, под називом „Моделовање и оптимизација електрификације енергане у индустријским постројењима“ представља значајан и оригиналан научни допринос у области којој дисертација припада (Технолошко инжењерство; Хемијско инжењерство), што је и потврђено објављивањем више радова у међународним часописима (категорије M21a, M21 и M23). Предмет и циљеви који су дефинисани у извештају за оцену научне заснованости теме су у потпуности остварени.

Комисија је мишљења да ова докторска дисертација испуњава све захтеване критеријуме као и да је кандидат током израде дисертације показао научноистраживачку способност и самосталност у свим фазама израде дисертације.

Комисија предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду да докторску дисертацију под називом „Моделовање и оптимизација електрификације енергане у индустријским постројењима“ кандидата Алексе Миладиновића прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, као и да се након завршетка процедуре кандидат позове на усмену одбрану докторске дисертације пред Комисијом у истом саставу.

У Београду,
28. септембар 2026. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Др Мирјана Кијевчанин, редовни професор
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
Др Јован Јовановић, ванредни професор,
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
Др Јасна Стајић–Трошић, научни саветник
Универзитет у Београду, Институт за хемију, технологију и металургију

.....
Др Александар Грујић, научни саветник
Универзитет у Београду, Институт за хемију, технологију и металургију

.....
Др Горица Иваниш, виши научни сарадник
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет