

пк ванр. проф др Стојадин Манојловић, дипл. инж. - председник.  
ред. проф. др Милан Рапайић, дипл. инж. - члан,  
пк ванр. проф др Бобан Бонцулић, дипл. инж. - члан,  
пк ванр. проф др Димитрије Бујаковић, дипл. инж. - члан,  
пп ванр. проф др Момир Станковић, дипл. инж. — члан.

Комисија за оцену и одбрану  
докторске дисертације  
кп Амокрane Салем-Билала,  
**извештај**, доставља.-

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ВА

Одлуком Наставно-научног већа Војне академије, број 13/46, акт број 360-175 од 03.07.2025. године, именовани смо у комисију за оцену и одбрану докторске дисертације кп Амокрane Салем-Билала (Salem-Bilal Amokrane), под називом:

### "Пројектовање напредних робусних система управљања и вођења беспосадних возила"

На основу члана 10. став 12. Правилника о пријави, изради и одбрани докторске дисертације и промоцији доктора наука ("СВЛ бр. 07/2024"), а након прегледа достављене дисертације, подносимо следећи

## ИЗВЕШТАЈ

### 1. Основни подаци о докторанду и докторској дисертацији

#### 1.1. Подаци о докторанду:

- **Име и презиме:** Салем-Билал Амокрane (Salem-Bilal Amokrane).
- **Датум и место рођења:** 25. јануар 1991, Оуед Атмениа, Мила, Алжир.
- **Националност:** Алжирац.
- **Адреса:** Спасеновићева 10b стан 5, Жарково, Чукарица, Београд, Србија.
- **Број телефона:** 063 8278459
- **е-маил:** amokranesalembilal@gmail.com
- **Претходно образовање:**
  - **Основне академске студије:** Диплома првог циклуса, Национална припремна школа за инжењерске студије, Роуиба-Алжир (2013). Просечна оцена: Добар (14/20).

- **Мастер академске студије:** Диплома инжењера информатичког инжењерства, Политехничка војна школа, Бордј Ел Бахри-Алжир (2016). Просечна оцена: Добар (14/20).
- **Професионални статус (занимање/чин):** капетан, запослен у Министарству одбране Алжира (период 2016-2021).

## **1.2. Подаци о докторској дисертацији:**

**Назив:** Пројектовање напредних робусних система управљања и вођења беспосадних возила.

**Научна област:** Електротехничко и рачунарско инжењерство.

**Ужа научна област:** Ракетни системи.

**Обим:** Дисертација има укупно 166 страница (xviii уводних страница + 148 текста), организованих у 5 поглавља. Садржи 199 референци, 8 табела и 44 илустрације. Нема прилога.

**Кључне речи:** беспосадно гусенично возило (БГВ), управљање са активним потискивањем поремећаја (ADRC), дубоко учење (DL), учење са подршком (RL), Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG), праћење возне траке, избегавање препрека, праћење лидера, препознавање поза, адаптивно управљање, аутономно кретање.

## **1.3. Подаци о ментору:**

- **Име и презиме:** Момир Станковић
- **Звање:** ванредни професор
- **Датум избора у звање:** 26.07.2024. године
- **Ужа научна област:** ракетни системи
- **Установа запослења:** Војна академија, Универзитет одбране у Београду

## **2. Предмет и циљ докторске дисертације**

Предмет истраживања ове докторске дисертације усмерен је на пројектовање, симулациону анализу, имплементацију и експерименталну верификацију интегрисаних, робусних и адаптивних система управљања и вођења беспосадних гусеничних возила (БГВ). Истраживање се фокусира на решавање кључних изазова у циљу постизања аутономије рада БГВ, као што су нелинеарна динамика кретања, нестационарност модела и утицај спољашњих поремећаја, као што је проклизавање погонских гусеница.

Основни циљ рада је развој интегрисаног решења које комбинује напредне технике аутоматског управљања, конкретно технику управљања са активним потискивањем поремећаја (ADRC), са алгоритмима дубоког учења (DL) за перцепцију окружења и учења са подршком (RL) за адаптивно подешавање параметара. Циљ истраживања је унапредити прецизност, робусност и адаптивност БГВ-а у реалним и оперативним сценаријима, као што су аутономно праћење задате возне траке са избегавањем препрека и аутономно праћење људског лидера.

Научни значај овог истраживања огледа се у доприносу развоју интелигентних система управљања и вођења за беспосадна гусенична возила, који омогућавају поуздано и прецизно аутономно кретање у сложеним и променљивим условима. Примена интегрисаног приступа који обједињује робусне технике управљања и савремене алгоритме вештачке интелигенције представља иновативан корак ка повећању нивоа аутономије и функционалности БГВ-а у реалним оперативним мисијама. Резултати овог истраживања могу се применити у доменима војне технике, спасилачких операција, логистике и извиђања, где је потребно деловање у

ризичним, неприступачним или непредвидивим срединама без директне људске интервенције.

### 3. Основне хипотезе

Дисертација полази од опште и посебних хипотеза које су систематски проверене кроз истраживање:

#### Општа хипотеза:

- Пројектовање напредних алгоритама управљања БГВ са активним потискивањем поремећаја и адаптивних начина подешавања параметара, интегрисаних са системима вођења заснованим на DL-у, омогућава постизање високих перформанси аутономног кретања БГВ у условима деловања унутрашњих и спољашњих поремећаја. Кроз реализацију истраживања, ова општа хипотеза је у потпуности потврђена кроз симулационе и експерименталне резултате у различитим сценаријима представљеним у оквиру докторске дисертације.

#### Посебне хипотезе:

- Примена напредног робусног алгорита управљања са активним потискивањем поремећаја (ADRC) ће, у поређењу са стандардним индустријским техникама управљања, омогућити боље перформансе и робусност аутономног кретања возила. Ова хипотеза претпоставља да ће ADRC концепт, који све нелинеарности, нестационарности модела и спољашње поремећаје (попут проклизавања гусеница) третира као јединствени „укупни поремећај“ и активно га потискује у реалном времену, фундаментално надмашити класичне регулаторе. Очекује се да ће ADRC систем показати бољу прецизност праћења, генерисати управљачке сигнале без изражених скоковитих промена и показати значајно већу отпорност на динамичке промене у систему и окружењу, што су кључна ограничења PID регулатора у БГВ применама. Хипотеза је проверена и потврђена кроз опсежне симулационе и реалне експерименте на лабораторијском БГВ возилу, који су показали да ADRC регулатори обезбеђују значајно смањење грешака праћења путање, управљачке сигнале без изражених скоковитих промена и изузетну робусност на проклизавање и шум сензора у поређењу са класичним PID регулаторима.
- Реализација система вођења базираног на алгоритмима дубоког учења у обради података са камере и LiDAR сензора омогућиће поуздано аутономно кретање и напредну интеракцију. Претпоставља се да ће интеграција савремених DL модела (као што су YOLOv2 за сегментацију траке, YOLOv8 за детекцију објеката и MPP за препознавање позе) створити робустан и ефикасан систем перцепције. Овај систем ће омогућити поуздано аутономно праћење задате возне траке уз симултано избегавање препрека, као и интерактивно праћење људског лидера са интерпретацијом његових команди задатих позом. Тиме се постиже виши степен аутономије БГВ-а и побољшава природна интеракција између човека и возила. Хипотеза је проверена и потврђена кроз успешну имплементацију и експерименталну валидацију на реалној БГВ платформи, демонстрирајући поуздану детекцију и праћење возне траке са избегавањем препрека, као и ефикасно праћење лидера уз препознавање поза и гестова у реалним условима.

- Имплементација целокупног пројектованог система управљања и вођења на реалној лабораторијској БГВ платформи пружиће валидирану основу за даљи развој и потенцијалну примену на оперативним војним и цивилним беспосадним возилима. Ова хипотеза претпоставља да ће успешна демонстрација функционалности интегрисаног система на физичкој платформи послужити као кључни доказ ефикасности концепта. Тиме се преошћава јаз између теоријских разматрања и симулација са једне стране, и практичне применљивости са друге, стварајући конкретну и тестирану основу за пренос технологије на комплексније и веће системе. Хипотеза је проверена и потврђена кроз успешну интеграцију свих пројектованих модула и детаљну експерименталну валидацију на лабораторијском БГВ возилу (Поглавље 3.4), што је недвосмислено показало функционалност система и његов потенцијал за даљи развој и примену на оперативним војним и цивилним беспосадним возилима.
- Примена адаптивног подешавања параметара ADRC регулатора у реалном времену, коришћењем RL, омогућиће боље перформансе праћења у поређењу са ADRC регулатором са константним параметрима, посебно у условима променљивих поремећаја. Стандардни ADRC са фиксним параметрима може бити субоптималан у драстично променљивим условима. Ова хипотеза претпоставља да ће ADRC-RL приступ, где Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) агент учи да динамички прилагођава кључне параметре ADRC-а (пропусне опсеге) на основу тренутног стања система, значајно побољшати адаптивност и робусност. Очекује се да ће овакав систем остварити прецизније праћење и бржу адаптацију у сценаријима са променљивом брзином лидера, динамичким проклизавањем и присуством мерног шума. Хипотеза је проверена и потврђена кроз опсежне симулационе студије у MATLAB/Simulink окружењу (Поглавље 4), које су показале да ADRC-RL систем значајно надмашује перформансе ADRC-а са константним параметрима, посебно у условима динамичких промена брзине лидера, сложеност проклизавања гусеница и присуства мерног шума.

Кроз реализацију истраживања општа и посебне хипотезе су у потпуности потврђене кроз симулационе и експерименталне резултате у различитим сценаријима представљеним у оквиру докторске дисертације.

#### 4. Кратак опис садржаја докторске дисертације

Дисертација је организована кроз пет поглавља.

- **Поглавље 1 – Увод:** Пружа шири контекст истраживања, дефинише научни проблем и предмет рада. Представљене су основне и посебне хипотезе, постављени задаци и детаљно описана примењена научна методологија. На крају, дат је преглед очекиваних резултата и научних доприноса дисертације.
- **Поглавље 2 – Основне карактеристике беспосадних возила и аутономног кретања:** Детаљно анализира историју развоја БВ, нивое аутономије, типове БВ са посебним освртом на гусенична возила, као и општу структуру система аутономног кретања. Разматрају се изазови и приступи пројектовању система вођења и управљања, укључујући преглед релевантне литературе.

- **Поглавље 3 – Пројектовање ADRC система управљања и система вођења БГВ-а:** Представља детаљно пројектовање ADRC система управљања и вођења за лабораторијско БГВ. Описан је кинематички модел праћења путање, поступак пројектовања ADRC регулатора за лонгитудинални и латерални канал, као и систем вођења заснован на DL-у за задатке праћења возне траке са избегавањем препрека и праћења лидера. На крају поглавља приказана је симулациона и експериментална валидација предложених решења.
- **Поглавље 4 – Пројектовање адаптивног ADRC управљања на бази учења са подршком за БГВ:** Истражује унапређење ADRC система кроз адаптивно подешавање параметара коришћењем DDPG алгоритма, са фокусом на задатак аутономног праћења лидера. Објашњена је теоријска основа RL и DDPG алгоритма, детаљно разрађен ADRC-RL приступ (дефинисање стања, акција, функција награде и архитектуре DDPG агената) и представљени симулациони резултати.
- **Поглавље 5 – Закључак:** Сумира кључне резултате и доприносе дисертације, даје осврт на потврђеност хипотеза, сагледава ограничења истраживања и предлаже будуће правце рада у области аутономног кретања БГВ-а.

## 5. Остварени резултати и научни допринос докторске дисертације

Кандидат Амокране Салем-Билал је у својој дисертацији остварио значајне научне и стручне резултате у научној области аутоматског управљања и вођења, чији се допринос огледа у следећем:

- Развијен је и примењен кинематички модел БГВ-а који експлицитно укључује ефекте проклизавања гусеница. Научни допринос се огледа у формулацији модела који пружа реалистичнију основу за анализу система управљања. За разлику од идеализованих модела, овај приступ омогућава директно разматрање једног од најзначајнијих поремећаја у кретању БГВ-а на неуређеним теренима, што је предуслов за пројектовање робусних управљачких алгоритама.
- Пројектован је, имплементиран и кроз реалне експерименте валидиран робусни ADRC систем управљања за БГВ. Допринос се огледа у практичној демонстрацији супериорности ADRC технике у односу на индустријски стандард (PID регулатор) за специфичну примену на БГВ. Експериментално је потврђено да предложени систем остварује прецизније праћење референтне путање, генерише управљачке сигнале са значајно смањеним скоковитим променама (што имплицира мању потрошњу енергије и мање механичко хабање) и показује супериорну робусност у реалним условима, успешно компензујући нелинеарности система и поремећаје.
- Успешно је интегрисан скуп напредних DL алгоритама (YOLOv8, YOLOPv2, MPP) у јединствен, модуларан систем перцепције и вођења. Ово представља значајан инжењерски и научни допринос јер је створен комплетан перцептивни ланац, од аквизиције слике до генерисања управљачких сигнала. Демонстрирана је висока функционалност система у обављању два комплексна задатка: (1) аутономно праћење возне траке са успешним избегавањем препрека и (2) аутономно праћење људског лидера са способношћу интерпретације команди задатих позом. Овим је остварен висок степен ситуационе свесности и интерактивне аутономије возила.



- Предложена је и кроз симулације потврђена иновativна стратегија за адаптивно подешавање параметара ADRC регулатора заснована на DDPG алгоритму (ADRC-RL). Ово је кључни научни допринос који адресира фундаментално ограничење стандардног ADRC-а – фиксне параметре. Показано је да RL агент може успешно да „научи“ оптималну политику за динамичко подешавање пропусних опсега регулатора, што доводи до значајног побољшања перформанси (смањење грешке праћења за преко 60% у симулацијама) у присуству комплексних, временски променљивих поремећаја. Овај резултат отвара пут ка развоју нове генерације високо-адаптивних управљачких система.
- Реализована је свеобухватна интеграција и валидација пројектованих система, чиме је демонстриран потенцијал комбиновања напредних техника управљања и вештачке интелигенције за унапређење нивоа аутономије и перформанси БГВ-а у реалним и изазовним сценаријима кретања.

Научни допринос дисертације је оригиналан и огледа се у успешној синтези и примени најсавременијих метода из области аутоматског управљања и вештачке интелигенције на специфичан и изазован проблем аутономије беспосадних гусеничних возила.

## 6. Објављени и саопштени научни резултати који чине саставни део докторске дисертације

Резултати истраживања проистекли из ове докторске дисертације објављени су, или су у процесу рецензије, у следећим научним радовима:

- **Amokrane, S-B.**, Laidouni, M., Adli, T., Madonski, R., Stanković, M., Active disturbance rejection control for unmanned tracked vehicles in leader-follower scenarios: Discrete-time implementation and field test validation, *Mechatronics*, Vol. 97 (2024): 103114, DOI : [10.1016/j.mechatronics.2023.103114](https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2023.103114) (M22).
- **Amokrane, S-B.**, Bujaković, D., Pavlović, B., Andrić, M., Adli, T., Enhancing Intrusion Detection System Performance through Feature Selection, *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 22 No. 1 (2025), DOI : [10.12700/APH.22.1.2025.1.10](https://doi.org/10.12700/APH.22.1.2025.1.10) (M23)
- **Amokrane, S-B.**, Stanković, M., Madonski, R., Benyahia, A., Fareh, R., Adaptive Tuning of Active Disturbance Rejection Control Based on Deep Reinforcement Learning: Case of Leader-Following in Unmanned Tracked Vehicles, *Proc IMechE Part I: J Systems and Control Engineering* (Rad је u postupku recenzije) (M22).
- **Amokrane, S-B.**, Stanković, M., Madonski, R., Benyahia, A., Lane Following with Obstacle Avoidance for Unmanned Tracked Vehicles Using Monocular Vision and Active Disturbance Rejection Control, *Control Engineering Practice* (Rad је u postupku recenzije) (M22).
- Adli, T., **Amokrane, S-B.**, Pavlović, B., Laidouni, M., Benyahia, A., Anomaly network intrusion detection system based on NetFlow using machine/deep learning, *Vojnotehnički glasnik*, Vol. 71 No. 4 (2023), pp. 941-969, DOI: [10.5937/vojtehg71-46058](https://doi.org/10.5937/vojtehg71-46058) (M51).
- Laidouni, M., Benyahia, A., Pavlović, B., **Amokrane, S-B.**, Adli, T., Deep learning channel estimation for 5G wireless communications, *Vojnotehnički glasnik*, Vol. 71 No. 4 (2023), pp. 911-940, DOI: [10.5937/vojtehg71-46057](https://doi.org/10.5937/vojtehg71-46057) (M51).

- **Amokrane, S-B.**, Stanković, M., Benyahia, A., Projektovanje upravljanja besposadnog vozila sa aktivnim potiskivanjem poremećaja na bazi dubokog učenja sa podrškom: studija slučaja praćenje lidera, 30. Nacionalna konferencija YU INFO 2024, str. 332-339, Mart 2024, Kopaonik, Srbija (M63).
- **Amokrane, S-B.**, Andrić, M., Fuzija vizuelnih i termalnih slika u vojnim primenama pomoću fazi logike, Naučna konferencija vojnih nauka „VojNa 2023”, Maj 2023, Beograd (M63).
- Benyahia, A., Stanković, M., **Amokrane, S-B.**, Adaptive Control of a 5-DOF Upper Limb Exoskeleton for Passive Rehabilitation: ADRC with Online Model Parameter Estimation, ICIST 2024 Proceedings, pp.162-175, March, 2024, Kopaonik Serbia (M63).

Објављени резултати представљају конкретну потврду достигнућа из докторске дисертације.

## 7. Подаци о извршеној провери на плагијаризам

Провера оригиналности докторске дисертације извршена је применом софтвера *iThenticate*. Технички извештај о провери на плагијаризам је показао 2% поклапања са претходно објављеним цитираним научним радом кандидата Амокроне Салем-Билала, што се не може сматрати плагијаризмом. Сходно томе, анализа техничког извештаја о провери на плагијаризам и извештај ментора о оригиналности потврдили су да је докторска дисертација капетана Салема Билала Амокронеа оригинална, да представља резултат самосталног научноистраживачког рада докторанда, и да су све коришћене референце правилно наведене.

## 8. Закључак са детаљним образложењем научног доприноса докторске дисертације

Докторска дисертација кандидата Амокроне Салем-Билала, под насловом „Пројектовање напредних робусних система управљања и вођења беспосадних возила“ представља оригиналан и целовит научноистраживачки рад који даје значајан допринос у области електротехничког и рачунарског инжењерства, специфично у домену пројектовања и реализације система вођења и управљања беспосадних система.

Кандидат је успешно интегрисао напредне теоријске концепте из области аутоматског управљања (ADRC, ADRC-RL) и вештачке интелигенције (DL, RL) и применио их за решавање конкретног, практично релевантног проблема. Научни допринос је вишеструк: од развоја применљивог кинематичког модела са проклизавањем, преко успешне експерименталне валидације робусног ADRC система управљања, до предлога иновативног адаптивног система коришћењем учења са подршком, што представља најновији правац истраживања у свету.

Рад је написан систематично, јасан је и терминолошки прецизан. Методологија истраживања је адекватно постављена, а резултати су уверљиво представљени и критички анализирани. Закључци су утемељени на спроведеним симулацијама и, што је посебно важно, реалним експериментима. Резултати истраживања из ове докторске дисертације су јавно публиковани у релевантним међународним часописима и зборницима конференција, што потврђује њихов научни квалитет и релевантност.

Комисија закључује да је докторска дисертација урађена у складу са одобреном пријавом теме докторске дисертације (Одлука Сената УО, број 5/150, акт број 23-193 од 17.07.2024. године), да представља оригинално научно дело и да су се стекли услови за њену одбрану. Сходно томе, Комисија предлаже Наставно-научном већу Војне академије Универзитета одбране у Београду да докторску дисертацију под насловом „Пројектовање напредних робусних система управљања и вођења беспосадних возила“ кандидата Амокроне Салем-Билала стави на увид јавности и након тога прихвати.

Не постоје оправдани разлози за ограничавање јавног увида у садржај докторске дисертације, нити за ограничавање присуства одбрани докторске дисертације.

У Београду, 23.07.2025. године.

**КОМИСИЈА:**



пк ванр. проф др Стојадин Манојловић, дипл. инж. - председник,



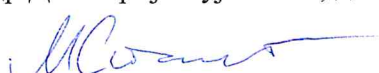
ред. проф. др Милан Рапаић, дипл. инж. - члан,



пк ванр. проф. др Бобан Бонцулић, дипл. инж. - члан,



пк ванр. проф. др Димитрије Бујаковић, дипл. инж. - члан,



пп ванр. проф др Момир Станковић, дипл. инж. — члан.

Достављено:

- Наставно-научном већу ВА,
- Катедри ВЕИ (е/р),
- Катедри ТиИ (е/р),
- а/а.

