Чувати до краја 2031. године
Функција 03, редни број 21
12.11.2026. год. пк Сретен Перић

пк проф. др Сретен Перић, дипл. инж.
пк проф. др Бранимир Б. Крстић, дипл. инж.
гм доц. др Славко Ракић, дипл. инж.
проф. др Јованка Лукић, дипл. инж.
проф. др Данијела Милорадовић, дипл. инж.

Оцена докторске дисертације,
**ИЗВЕШТАЈ.-**

**НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ**
**ВОЈНЕ АКАДЕМИЈЕ**

Одлуком Наставно-научног већа Војне академије Број 06/188, акт ВА бр. 1169-329 од 30.10.2026. године одређени смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације студента докторских академских студија Војномашинско инжењерство капетана прве класе Момира Дракулића (број индекса 3007/2021), под насловом:

**„Моделирање и експериментална валидација контактних сила током кретања брзоходног гусеничног возила по деформабилној подлози"**

Након проучавања рукописа докторске дисертације, Оцене оригиналности докторске дисертације и Техничког извештаја о провери на плагијаризам, а у складу са чланом 10. Правилника о пријави, изради и одбрани докторске дисертације и промоцији доктора наука („Службени војни лист", бр. 07/24), подносимо следећи

# И З В Е Ш Т А Ј

## 1. ОСНОВНИ ПОДАЦИ О ДОКТОРАНДУ И ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ

### 1.1. Основни подаци о докторанду

Момир М. Дракулић рођен је 07.06.1993. године у Ћаковици, Република Србија. Основне академске студије завршио је на Војној академији Универзитета одбране у Београду 09.09.2017. године, са просечном оценом 9,11, одбранивши завршни рад „*Управљање променом степена преноса код планетарних мењачких преносника*", чиме је стекао звање дипломирани инжењер машинства. Мастер академске студије завршио је на Машинском факултету Универзитета у Београду 12.03.2020. године, са просечном оценом 9,30, одбранивши мастер рад „*Развој математичког модела за прорачун система управљања моторног возила*", чиме је стекао академски назив мастер инжењер машинства.

Запослен је на Војној академији у Београду, на Катедри војномашинског инжењерства, у чину капетана прве класе. Говори и пише српски и енглески језик, а самостално користи програмске језике и софтверске пакете за моделирање, нумеричке прорачуне и анализу (MATLAB/Simulink, Python, Visual Basic, C#, LaTeX, SolidWorks, ADAMS, CATIA V5).

Тему докторске дисертације одобрио је Сенат Универзитета одбране у Београду одлуком број 4/165, акт РУО број 25-276 од 21.11.2025. године, којом је за ментора именован пуковник, редовни професор др Бранимир Б. Крстић, дипл. инж.

### 1.2. Основни подаци о докторској дисертацији

| | |
|---|---|
| Наслов (српски) | Моделирање и експериментална валидација контактних сила током кретања брзоходног гусеничног возила по деформабилној подлози |
| Наслов (енглески) | Modeling and Experimental Validation of Contact Forces in the Interaction Between High-Speed Tracked Vehicles and Deformable Terrain |
| Аутор | Момир М. Дракулић |
| Ментор | пуковник, редовни професор др Бранимир Б. Крстић, дипл. инж., Универзитет одбране у Београду, Војна академија |
| Установа / година | Универзитет одбране у Београду, Војна академија, Београд, 2026. година |
| Научно поље / област | Техничко-технолошке науке / Машинско инжењерство |
| Ужа научна област | Моторна возила и мотори |
| Обим | 156 страна (основни текст на 146 нумерисаних страна), 9 поглавља, 77 слика, 5 табела, 124 библиографске јединице |
| Језик и писмо | Српски језик, ћирилица |
| Кључне речи | брзоходно гусенично возило, интеракција гусенице и подлоге, деформабилна подлога, бочно клизање, симулациони модел |

Наслов докторске дисертације истоветан је наслову из пријаве теме коју је Сенат Универзитета одобрио. Докторска дисертација написана је на српском језику и садржи резиме и кључне речи на српском и енглеском језику, предговор, садржај, девет поглавља и списак литературе.

## 2. ПРЕДМЕТ И ЦИЉ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

**Предмет** истраживања је развој, анализа и валидација напредног модела за израчунавање сила које настају у контактној зони између гусеница и деформабилне подлоге код брзоходних гусеничних возила, са посебним акцентом на динамичко понашање возила током заокрета и на трајекторију кретања у условима израженог бочног клизања. Истраживање је спроведено на примеру борбеног возила пешадије БВП М80А.

Актуелност и значај теме проистичу из чињенице да контакт гусенице и терена директно одређује вучне карактеристике, управљивост, стабилност и енергетску ефикасност возила. Постојећи приступи у литератури деле се на рачунарски веома захтевне моделе засновани на методи коначних и дискретних елемената, који тешко могу да се примене у симулацијама у реалном времену, и на поједностављене кинематичке моделе, који занемарују утицај деформабилне подлоге и клизање гусеница. Како је показано у прегледу стања у области, у литератури не постоји јединствен приступ који истовремено обезбеђује високу физичку веродостојност, малу рачунарску захтевност и применљивост у реалном времену. Додатни проблем представља ограничена доступност експерименталних података о контактним силама на борбеним гусеничним возилима.

**Основни циљ** истраживања је развој и експериментална валидација напредног симулационог модела за процену динамичких сила у контакту гусеница и подлоге на примеру возила БВП М80А, који омогућава поуздану анализу понашања возила у заокрету и анализу трајекторије уз појаву бочног клизања. Подциљеви су:

- критичка анализа постојећих теоријских и нумеричких модела интеракције гусеница и терена с циљем идентификације недостатака и ограничења, посебно у условима заокрета возила;
- развој симулационог модела у MATLAB/Simulink програмском окружењу који интегрише карактеристике деформабилног терена и кључне динамичке параметре возила БВП М80А;
- анализа и квантификација утицаја најзначајнијих параметара возила (расподела масе, карактеристике система ослањања) и терена (отпорност на смицање, кохезија) на генерисане силе у контакту;
- експериментална валидација развијеног модела упоређивањем резултата симулација са стварним подацима добијеним експерименталним мерењима на возилу БВП М80А у реалним условима кретања;
- развој методологије за предвиђање трајекторије кретања возила узимајући у обзир ефекте израженог бочног клизања на деформабилним теренима.

Комисија оцењује да су предмет и циљ дисертације јасно дефинисани, да су у складу са одобреном пријавом теме и да представљају оригиналну идеју значајну за развој научне области динамике кретања борбених возила, као и за њену примену у пројектовању, модернизацији и развоју система управљања гусеничним возилима.

## 3. ОСНОВНЕ ХИПОТЕЗЕ

Хипотезе истраживања дефинисане су у пријави теме докторске дисертације коју је одобрио Сенат Универзитета. Њихова провера у дисертацији спроведена је експерименталном валидацијом и симулационом анализом, а Комисија их оцењује на следећи начин.

**Општа хипотеза:** развој и примена напредних симулационих модела, уз експерименталну валидацију, омогућава прецизно предвиђање сила у контактној зони гусеница и подлоге код брзоходних гусеничних возила, што доприноси бољем разумевању динамике возила током заокрета и предвиђању стварне трајекторије кретања у условима израженог бочног клизања на деформабилним теренима. *Хипотеза је потврђена.* Развијени и експериментално валидирани модел омогућава прорачун контактних сила, угла бочног клизања, радијуса заокрета и трајекторије возила на различитим деформабилним подлогама.

**Посебне хипотезе:**

1. *Симулациони модел који интегрише карактеристике терена и параметре гусеница прецизније предвиђа силе у контактној зони у односу на постојеће моделе, са просечном релативном грешком мањом од 10%.* Хипотеза је потврђена у делу који се односи на тачност: просечне релативне грешке подужних сила у три анализирана мерења износе од 3,49% до 7,83%, односно не прелазе 8%. Предност у односу на кинематичке моделе који занемарују клизање показана је упоредним анализама трајекторија (поглавља 5.2 и 5.4), а у односу на рачунарски захтевне моделе (МКЕ, МДЕ) у погледу рачунарске ефикасности.
2. *Валидација развијеног модела на основу експерименталних података добијених испитивањем возила БВП М80А у реалним условима показује висок ниво поклапања између симулационих и измерених резултата.* Хипотеза је потврђена: модел адекватно

репродукује временски ток и амплитуду измерених подужних сила у три различита режима кретања (константна брзина, благо убрзање, променљив режим).

3. *Прецизно моделирање динамике бочног клизања као функције кинематике заокрета и карактеристика терена омогућава предвиђање стварне трајекторије возила са значајно мањом грешком у односу на моделе који примарно разматрају само лонгитудинално клизање.* Хипотеза је потврђена у квалитативном смислу: симулацијама на пет врста подлога показано је да трајекторија коју даје модел значајно одступа од идеалног кинематичког модела без клизања, као и да се на подлогама мање носивости јављају губитак стабилности заокрета и угао бочног клизања до 60°. Упоредном анализом одзива PI/PID регулатора на идеализованом кинематичком моделу и на развијеном динамичком моделу показано је да кинематички модел, који занемарује бочно клизање и интеракцију гусенице и подлоге, не обезбеђује поуздану основу за коначну параметризацију алгоритама управљања.

## 4. КРАТАК ОПИС САДРЖАЈА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Докторска дисертација структурирана је у девет поглавља:

**1. Уводна разматрања** (стр. 1 - 4). Образложен је значај гусеничних возила и интеракције гусенице и подлоге, представљене су две основне стратегије моделирања (кинематички и динамички модели), проблем бочног клизања у заокрету и значај експерименталне валидације.

**2. Предмет и циљ истраживања** (стр. 5 - 7). Дефинисани су предмет, основни циљ и подциљеви истраживања.

**3. Преглед стања у области истраживања** (стр. 8 - 30). Приказан је историјски развој гусеничних возила и терамеханике као научне области, емпиријски и полуемпиријски модели (Bekker, Janosi-Hanamoto, Wong-Reece), метода коначних елемената, метода дискретних елемената и Multi-Body метода, као и примена терамеханичких модела у динамичким симулацијама кретања возила, спрегнутим приступима и управљању аутономним возилима. Закључено је да у литератури не постоји приступ који обједињује физичку веродостојност, малу рачунарску захтевност и примену у реалном времену.

**4. Сопствена истраживања** (стр. 31 - 68). Обухвата математички модел интеракције гусенице и подлоге (претпоставке, једначине кретања, одређивање смицајног помераја, нормални напон и тангенцијалне силе у контакту гусенице са подлогом), симулациони модел у MATLAB/Simulink окружењу и експериментална истраживања на возилу БВП М80А (анализа система за пренос снаге, мерење обртног момента мерним тракама и угаоних брзина индуктивним давачима на излазним вратилима трансмисије, мерна и аквизициона опрема, реализација мерења).

**5. Резултати истраживања** (стр. 69 - 123). Садржи валидацију симулационог модела, симулације стабилног и нестабилног заокрета и кретања возила по сложеној трајекторији на пет деформабилних подлога, анализу осетљивости модела на промену шест конструкционих параметара возила и примену модела у тестирању PI и PID алгоритама за праћење трајекторије.

**6. Примена машинског учења у циљу повећања тачности резултата симулационог модела** (стр. 124 - 131). Развијен је хибридни физички информисани модел заснован на вишеслојним неуронским мрежама (MLP) и LightGBM алгоритму, уз аутоматску оптимизацију хиперпараметара (Optuna), обучен и тестиран на подацима из симулација и

експеримената. Представљени физички информисан модел у значајној даје тачније вредности сила у контакту него развијени симулациони модел.

**7. Примена развијеног симулационог модела** (стр. 132 - 134). Приказане су могућности примене модела у прорачуну динамике возила, модернизацији, прорачуну оптерећења трансмисије, пројектовању хибридних гусеничних возила и тестирању алгоритама аутоматског управљања.

**8. Закључак** (стр. 135 - 137). Анализиран је степен остварења циља, кључни резултати, примена модела и правци будућих истраживања.

**9. Литература** (стр. 138 - 146). Наведено је 124 библиографске јединице, од којих је већина публикована у међународним часописима из области терамеханике и динамике возила.

## 5. ОСТВАРЕНИ РЕЗУЛТАТИ И НАУЧНИ ДОПРИНОС ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Комисија као најзначајније резултате и доприносе дисертације издваја следеће:

1. **Математички модел интеракције гусенице и деформабилне подлоге** заснован на полуемпиријској Janosi–Hanamoto теорији смицајног напона, прилагођен брзоходном гусеничном возилу БВП М80А. Модел аналитички одређује смицајни померај у контактној зони за обе гусенице (подужна и попречна компонента), узима у обзир асиметрију нормалног напона у заокрету и израчунава тангенцијалне силе у контакту, отпорни момент заокрета, угао бочног клизања и трајекторију возила. Избор полуемпиријског приступа омогућава прихватљиву тачност уз ниске захтеве у погледу процесорског времена извршавања симулације и потребне меморије, што је предуслов за примену у реалном времену.
2. **Симулациони модел у MATLAB/Simulink окружењу** модуларне структуре, са брзинама премотавања гусеница као улазним величинама, параметризован за возило БВП М80А (маса 13 850 kg, момент инерције 42 086 kgm², дужина контакта 3,3 m, ширина трага 2,526 m) и за пет типова подлоге (снег, шљунак, мочвара, песак, глина), погодан за брзу промену параметара и возила и терена.
3. **Експериментални подаци са борбеног возила БВП М80А.** Спроведено је десет мерења у току заокрета возила, у којима су мерени обртни моменти (мерне траке) и угаоне брзине (индуктивни давачи) на излазним вратилима трансмисије, а подужне силе у контакту гусенице и подлоге одређене су индиректно, уз урачунавање механичких губитака. Имајући у виду ограничену доступност сличних података у јавној литератури, прикупљени подаци представљају вредан допринос у области терамеханике брзоходних гусеничних возила.
4. **Експериментална валидација модела.** За три одабрана мерења (константна брзина, благо убрзање, променљив режим кретања) просечна релативна грешка подужних сила приказана је у табели 1. Укупно одступање извршених симулација у односу на измерене силе не прелази 8%, а у просечним вредностима сила износи 4,98% за десну и 3,01% за леву гусеницу. Уочена су и локална одступања у појединим тренуцима (у једном случају преко 30%), која се у дисертацији приписују нехомогености терена, сложености система за пренос снаге и поједностављењима модела.

*Табела 1. Просечне релативне грешке подужних сила (симулација у односу на мерење) на влажној травнатој подлози*

| Мерење | Режим кретања у заокрету | Десна гусеница | Лева гусеница |
|---|---|---|---|
| 1 | приближно константна брзина | 6,65% | 5,75% |
| 2 | благо повећање брзине | 7,52% | 6,37% |
| 3 | промењљив режим (убрзавање и успоравање) | 7,83% | 3,49% |
| Просек | усредњене вредности сила (слика 5.4) | 4,98% | 3,01% |

5. **Анализа утицаја карактеристика терена на динамику заокрета.** Симулацијама стабилног (унутрашња гусеница 30→25 km/h) и нестабилног (30→20 km/h) заокрета на пет подлога показано је да радијус заокрета, бочно клизање и расподела контактних сила значајно зависе од носивости подлоге. На подлогама мање носивости (снег, шљунак, песак) долази до губитка стабилног режима заокрета, спиралног кретања и пораста угла бочног клизања до 60°, чиме су одређене границе стабилности заокрета. Модел је тестиран и у два сценарија сложеног кретања са наизменичним заокретима у оба смера.
6. **Анализа осетљивости модела** на промену масе, висине тежишта, момента инерције, ширине трага, дужине контакта и ширине гусенице (у границама од ±20% до ±50%) показала је да модел доследно одражава физички очекиване трендове. Највећи утицај на подужне силе и геометрију заокрета има дужина контакта гусенице и подлоге, док су утицаји висине тежишта и момента инерције на подужне силе у стационарном режиму занемарљиви.
7. **Примена модела у тестирању алгоритама аутоматског управљања.** Праћење задате трајекторије PI и PID регулаторима испитано је на свих пет подлога и упоређено са идеализованим кинематичким моделом. Показано је да кинематички модел може послужити за почетну проверу логике управљања, али да за коначно подешавање регулатора треба користити модел са реалном интеракцијом гусенице и подлоге.
8. **Хибридни модел машинског учења** (MLP и LightGBM уз оптимизацију у Optuna), који комбинује резултате симулације и експерименталне податке, на три тест скупа даје просечне релативне грешке подужних сила од 2,08% до 4,22% за десну и од 2,87% до 3,96% за леву гусеницу. За десну гусеницу то је значајно мање од грешака самог симулационог модела (6,65–7,83%). У дисертацији је јасно наглашено да је овако обучен модел везан за конкретно возило и подлогу и да га треба посматрати као допуну, а не замену физичког модела.
9. **Практична применљивост.** Модел се може користити за прорачун подужне и бочне динамике, процену утицаја конструкционих измена при модернизацији (додатна заштита, опрема, наоружање), прорачун оптерећења трансмисије, избор конфигурације хибридног погона и развој система управљања, уз смањење трошкова и ризика скупих експерименталних испитивања.

Комисија истиче да дисертација, поред наведених доприноса, јасно и коректно износи ограничења истраживања: експериментална валидација обухвата подужне силе, једну врсту подлоге (влажна трава) и заокрете у десно; бочне силе и трајекторија возила нису директно

мерени; расподела нормалног напона је апроксимирана линеарно, а систем за ослањање није експлицитно моделиран; хибридни модел машинског учења обучен је на ограниченом скупу података. Ова ограничења не умањују остварене доприносе, јер су дефинисана као оквир примене модела и као правци даљег рада.

## 6. ОБЈАВЉЕНИ И САОПШТЕНИ НАУЧНИ РЕЗУЛТАТИ КОЈИ ЧИНЕ САСТАВНИ ДЕО ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Резултати докторске дисертације верификовани су кроз следеће публикације:

1. **Drakulic, M.**, Peric, S., Djuric, A., & Rakic, S. (2025). Track–terrain interaction during steering of high-speed tracked vehicles: Numerical modeling and experimental validation. *Measurement*, 256, 118225. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.118225 (категорија **M21a**). Докторанд је први аутор рада, који је директно повезан са садржајем дисертације и објављен је након уписа на докторске студије, чиме је испуњен услов из члана 9. став 1. тачка 1) Правилника.
2. **Drakulic, M.**, & Stankovic, M. (2024). ADRC-Based Trajectory Tracking of Unmanned Tracked Vehicles Under High Slippage Disturbance. 2024 14th International Conference on Electrical Engineering (ICEENG), 362–366. https://doi.org/10.1109/ICEENG58856.2024.10566465 (саопштење на међународном скупу, категорија **M33**), повезано са темом праћења трајекторије гусеничног возила уз клизање (поглавље 5.4).
3. **Drakulic, M.**, Djuric, A., & Peric, S. (2026). Sensitivity analysis of a terramechanics model of track-terrain interaction with respect to vehicle design parameters. 11th International Congress Motor Vehicles & Motors 2026 (MVM2026), Kragujevac, 435–445. https://doi.org/10.24874/CMVM2026.028 (саопштење на међународном скупу, категорија **M33**). Рад представља анализу осетљивости развијеног терамеханичког модела на промену конструкционих параметара возила БВП М80А (маса, момент инерције, ширина трага, висина тежишта), која је приказана у поглављу 5.3 дисертације, уз коришћење математичког и симулационог модела из поглавља 4 и валидације из поглавља 5.1.
4. **Drakulic, M.**, & Djuric, A. (2026). Shear stress-based force modeling for M-84 tracked vehicle on deformable terrain. 12th International Scientific Conference on Defensive Technologies – OTEH 2026, 138–143. https://doi.org/10.5937/OTEH26024D (саопштење на међународном скупу, категорија **M33**). Рад приказује примену развијеног модела интеракције гусенице и подлоге на нивоу возила (пример возила М-84), са прорачуном сила у праволинијском кретању и заокрету као улазних величина за анализу погонског система и трансмисије. Одговара садржају поглавља 7 дисертације (примена модела, посебно прорачун оптерећења трансмисије и погонских елемената) и математичком моделу из поглавља 4.1.

## 7. ПОДАЦИ О ИЗВРШЕНОЈ ПРОВЕРИ НА ПЛАГИЈАРИЗАМ

Провера оригиналности рукописа докторске дисертације извршена је у складу са чланом 10. Правилника и Упутством о поступку провере на плагијаризам на Универзитету одбране у Београду (акт РУО, бр. 13-34 од 22.03.2024. године). Проверу је спровео Проректорат за научноистраживачку делатност Универзитета одбране у Београду коришћењем лиценцираног софтвера **iThenticate** и израдио Технички извештај о провери на плагијаризам (акт РУО, И бр. 17-147 од 14.09.2026. године).

Према Оцени оригиналности коју је израдио ментор, пуковник, професор др Бранимир Б. Крстић (акт број 10960-1 од 18.09.2026. године), у Техничком извештају није утврђено подударање текста дисертације са било којим извором, односно проценат подударања износи 0%. Анализом Техничког извештаја ментор је утврдио да је дисертација оригинална, да представља резултат научног рада докторанда и да су у потпуности испоштована академска правила цитирања и навођења извора, те да је оригиналност позитивно оцењена и да се поступак за оцену и одбрану може наставити.

Увидом у рукопис, Комисија је констатовала да су коришћени извори коректно цитирани (124 библиографске јединице), као и да су претходно публиковани резултати самог докторанда наведени као референце [4] и [38].

## 8. ЗАКЉУЧАК

На основу анализе рукописа докторске дисертације, Оцене оригиналности и Техничког извештаја, Комисија закључује:

- докторска дисертација „Моделирање и експериментална валидација контактних сила током кретања брзоходног гусеничног возила по деформабилној подлози" кандидата Момира Дракулића урађена је у складу са одобреном пријавом теме: наслов, предмет, циљ, хипотезе, методологија и програм истраживања су остварени, уз допунско поглавље о примени машинског учења које проширује одобрено истраживање;
- развијен је и експериментално валидиран модел интеракције гусенице и деформабилне подлоге који омогућава поуздану анализу контактних сила и динамике заокрета брзоходног гусеничног возила, уз одступање подужних сила од измерених вредности које не прелази 8%;
- дисертација садржи оригиналне научне и стручне доприносе у области моделирања интеракције гусенице и подлоге, експерименталне податке који су у јавној литератури ретки, и резултате применљиве у пројектовању, модернизацији и развоју система управљања гусеничним возилима;
- докторанд је испунио услов из члана 9. Правилника објављивањем рада у часопису категорије М21а као први аутор, директно повезаног са садржајем дисертације;
- оригиналност дисертације је позитивно оцењена, па је дисертација оригинално и самостално научно дело кандидата;
- стекли су се услови за јавну одбрану докторске дисертације.

Комисија је размотрила постојање разлога за ограничавање јавног увида у садржај дисертације или њених делова и присуства одбрани и сматра да не постоје оправдани разлози за такво ограничење.

Имајући у виду наведено, Комисија предлаже Наставно-научном већу Војне академије да прихвати овај извештај, да докторску дисертацију и извештај Комисије стави на увид јавности у трајању од 30 дана и да Сенату Универзитета одбране у Београду достави предлог да се донесе одлука о одбрани докторске дисертације кандидата капетана прве класе Момира Дракулића.

У Београду, 12.11.2026. године

**КОМИСИЈА:**

пуковник, редовни професор
др Сретен Перић, дипл. инж. (председник)

пуковник, редовни професор
др Бранимир Крстић, дипл. инж. (ментор, члан)

генерал-мајор, доцент
др Славко Ракић, дипл. инж. (члан)

редовни професор
др Јованка Лукић, дипл. инж. (члан)

редовни професор
др Данијела Милорадовић, дипл. инж. (члан)

РЕПУБЛИКА СРБИЈА
МИНИСТАРСТВО ОДБРАНЕ
ВОЈНА АКАДЕМИЈА
II
Бр. 807-12
13 NOV 2026
БЕОГРАД

**Достављено:**

- Наставно-научном већу Војне академије,
- Катедри ВМИ (е/р),
- а/а.