

Факултет МАШИНСКИ

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

87/4  
(Број захтева)Већу научних области техничких наука(Назив стручног већа коме се захтев упућује, сагласно  
Члану 6. и чл. 7 став 1. овог Правилника)18.03.2021.  
(Датум)

**ЗАХТЕВ**  
**за давање сагласности на предлог теме докторске дисертације**

Молимо да сходно чл. 46. ст.5. тач.3. Статута Универзитета у Београду („Гласник Универзитета“, број 131/06), дате сагласност на предлог теме докторске дисертације

**ОПТИМИЗАЦИЈА ФУНКЦИОНАЛНИХ И УПРАВЉАЧКИХ ПАРАМЕТАРА ХИБРИДНОГ  
ПОГОНСКОГ СИСТЕМА ВОЗИЛА ЈАВНОГ ГРАДСКОГ ПРЕВОЗА**

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ Мотори СУС

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

1. Име, име једног родитеља и презиме кандидата: МАРКА (НИКОЛА) КИТАНОВИЋА
2. Назив и седиште Факултета на коме је стекао високо образовање: Машински факултет Београд
3. Година дипломирања: 2010.
4. Назив магистарске тезе кандидата: \_\_\_\_\_
5. Назив Факултета на коме је магистарска теза одбрањена: \_\_\_\_\_
6. Година одбране магистарске тезе: \_\_\_\_\_
7. Назив Факултета на коме је кандидат уписао докторске студије: Машински факултет Београд

Одсек, смер или група: \_\_\_\_\_

Година уписа докторских студија: 2010.Обавештавамо Вас да је \_\_\_\_\_  
Наставно-научно веће Факултета  
(назив надлежног тела Факултета)на седници одржаној 18.03.2021  
размотрило предложену тему и закључило да је тема подобна за израду докторске дисертације.

ДЕКАН  
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

\_\_\_\_\_  
проф. др Радивоје Митровић

Прилог:

1. Предлог теме докторске дисертације са образложењем.
2. Акт надлежног тела факултета о подобности теме за израду докторске дисертације.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -

Број: 87/4

Датум: 18.03.2021. године

Београд, Краљице Марије 16

На основу захтева студента **Марка Китановића**, маг. инж. маш., бр. 1227/1 од 01.07.2019. године да му се одобри израда докторске дисертације, реферата Комисије у саставу: др Слободан Поповић, ванр. проф., ментор, др Ненад Миљкић, ванр. проф. и др Јован Дорић, ванр. проф., ФТН Нови Сад број 87/3 од 22.02.2021. године, а на основу члана 30. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 76/2005, 100/2007 – аутентично тумачење, 97/2008, 93/2012 и 89/2013), члана 64. Статута Машинског факултета (број 1450/4 од 14.06.2018. године) и члана 30. Правилника о докторским студијама Машинског факултета, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 18.03.2021. године, донело је следећу

### ОДЛУКУ

Прихвата се научна заснованост теме докторске дисертације и констатује да студент **МАРКО КИТАНОВИЋ**, маг. инж. маш. испуњава услове за израду докторске дисертације **«ОПТИМИЗАЦИЈА ФУНКЦИОНАЛНИХ И УПРАВЉАЧКИХ ПАРАМЕТАРА ХИБРИДНОГ ПОГОНСКОГ СИСТЕМА ВОЗИЛА ЈАВНОГ ГРАДСКОГ ПРЕВОЗА»**.

За ментора студенту **Марку Китановићу**, именује се **др Слободан Поповић, ванр. проф.**

Одлуку доставити: Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, ментору и архиви Факултета.

ДЕКАН  
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Радивоје Митровић

## ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

**Предмет:** Подобност теме и кандидата **Марка Н. Китановића** за израду докторске дисертације

Одлуком Наставно-научног већа бр. 87/2 од 21.01.2021. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Марка Н. Китановића, маг. инж. маш., студента Докторских студија на Машинском факултету Универзитета у Београду, за израду докторске дисертације и научне заснованости теме „Оптимизација функционалних и управљачких параметара хибридног погонског система возила јавног градског превоза“.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

## РЕФЕРАТ

### 1. Подаци о кандидату

#### 1.1. Биографски подаци

Кандидат Марко Китановић је рођен 29. јануара 1986. године у Женеви, Швајцарска. Прва 4 разреда основне школе (1993–1997) завршио је у „Ecole n°8 du Bois de la Cambre“, у Бриселу, Белгија. Пети, шести и седми разред (1997– 2000) завршио је у ОШ „Радоје Домановић“, у Београду, Република Србија. Основну школу (9 разреда у француском образовном систему) завршио је у „Collège Molière“, у Паризу, Француска, 2002. године. Након тога похађа и завршава прва два разреда средње школе (укупно 3 разреда у француском образовном систему) у „Lycée Louis Armand“ (научно усмерење), у Паризу, Француска. Средње образовање завршио је у Земунској гимназији (природно-математички смер) 2005. године.

Машински факултет Универзитета у Београду кандидат је уписао 2005. године, а Основне академске студије (ОАС) на одсеку Мотори СУС завршио је 2008. године са просечном оценом 8,91 (осам и 91/100). Током студија награђиван је за изванредан успех постигнут на Машинском факултету Универзитета у Београду на другој и трећој години Основних академских студија. Завршни рад на

Основним академским студијама под насловом „Анализа идеализованих термодинамичких циклуса мотора“, чији је ментор био проф. др Мирољуб Томић, одбранио је на Катедри за моторе са оценом 10 (десет).

Мастер академске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду кандидат је уписао 2008. године на модулу Мотори СУС и завршио 2010. године са просечном оценом 9,90 (девет и 90/100), одбранивши М. Sc. рад под насловом „Истраживање примене поступка турбоекспанзије код мотора СУС“, чији је ментор био проф. др Мирољуб Томић, са оценом 10 (десет). Кандидат је награђиван за изванредан успех постигнут на првој и другој години Мастер академских студија.

Укупна просечна оцена студија кандидата на Машинском факултету у Београду износи 9,41 (девет и 41/100).

Докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду кандидат је уписао 2010. године. Потенцијални ментор докторске дисертације је в. проф. др Слободан Ј. Поповић. Од јануара 2011. године кандидат је запослен на Машинском факултету као сарадник на пројекту Катедре за моторе „Истраживање и развој алтернативних погонских система и горива за градске аутобусе и комунална возила ради побољшања енергетске ефикасности и еколошких карактеристика“, који у текућем пројектном циклусу финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије. (ТР-35042). Од 11.07.2013. године запослен је на Катедри за моторе Машинског факултета Универзитета у Београду као асистент.

Кандидат у раду активно користи програмске пакете и развојна окружења Mathworks MATLAB/Simulink, NI LabVIEW, NI DIAdem, AVL BOOST, AVL Concerto, Ricardo WAVE, Simcenter Amesim, Autodesk AutoCAD, Microsoft Office.

Кандидат поседује активно знање француског и енглеског језика и служи се шпанским језиком.

## 1.2. Стечено научноистраживачко искуство

### 1.2.1. Преглед положених испита

Марко Н. Китановић је уписао Докторске академске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду школске 2010/2011. године. Положио је све обавезне и изборне испите предвиђене Програмом усавршавања са просечном оценом 10. Осим тога, положио је четири лабораторијска предмета (Истраживање и публикавање I, II, III и IV). У складу са Правилником за докторске студије Машинског факултета Универзитета у Београду, кандидат је успешно урадио и одбранио Пројекат идеје докторске дисертације.

Преглед свих положених испита дат је у наредној табели:

| Број | Назив предмета                                      | Предметни наставник                                                           | Семестар /ЕСПБ | Оцена |
|------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------|
| 1    | Виши курс математике                                | проф. др Стојан Раденовић                                                     | 1/5            | 10    |
| 2    | Нумеричке методе                                    | проф. др Миодраг Спалевић                                                     | 1/5            | 10    |
| 3    | ОМНИР и комуникација                                | проф. др Милош Недељковић                                                     | 1/5            | 10    |
| 4    | Одабрана поглавља из механике                       | проф. др Зоран Митровић                                                       | 1/5            | 10    |
| 5    | Мерења помоћу рачунара                              | проф. др Мирољуб Томић                                                        | 2/5            | 10    |
| 6    | Морелирање радног процеса мотора                    | проф. др Мирољуб Томић                                                        | 2/5            | 10    |
| 7    | Напредне технике у моторима СУС – одабрана поглавља | проф. др Мирољуб Томић                                                        | 2/5            | 10    |
| 8    | Специјална мерења код мотора СУС                    | проф. др Мирољуб Томић                                                        | 3/5            | 10    |
| 9    | Динамички проблеми мотора СУС                       | проф. др Мирољуб Томић                                                        | 3/5            | 10    |
| 10   | Истраживање и публикавање I                         | проф. др Милорад Милованчевић                                                 | 1/10           | 10    |
| 11   | Истраживање и публикавање II                        | проф. др Милорад Милованчевић                                                 | 2/15           | 10    |
| 12   | Истраживање и публикавање III                       | проф. др Ненад Миљић                                                          | 3/20           | 10    |
| 13   | Истраживање и публикавање IV                        | проф. др Слободан Поповић                                                     | 4/8            | 10    |
| 14   | Пројекат идеје докторске дисертације                | проф. др Слободан Поповић<br>проф. др Ненад Миљић<br>проф. др Драган Кнежевић | 4/22           | 10    |

#### 1.2.2. Учесће у извођењу наставе

Током рада на Катедри за моторе Машинског факултета Универзитета у Београду, кандидат је био ангажован за одржавање аудиторних и лабораторијских вежби из већине предмета матичног усмерења. Његово досадашње ангажовање систематизовано је посебно за нивое ОАС и МАС:

#### Основне академске студије (ОАС)

| Редни број | Назив предмета                           | Позиција | Ознака |
|------------|------------------------------------------|----------|--------|
| 1.         | Конструкција аутомобилских мотора – увод | 4.4.     | 0846   |
| 2.         | Индустријски компресори                  | 5.4.     | 0848   |
| 3.         | Хибридни погонски системи                | 6.3.     | 0850   |
| 4.         | Експлоатација и ремонт мотора            | 6.4.     | 1021   |
| 5.         | Стручна пракса Б-МОТ                     | 4.5.     | 0847   |
| 6.         | Стручна пракса Б-МФБ                     | 4.5.     | 0715   |

#### Мастер академске студије (МАС)

| Редни број | Назив предмета                              | Позиција | Ознака |
|------------|---------------------------------------------|----------|--------|
| 1.         | Радни процеси мотора                        | 1.1.     | 0852   |
| 2.         | Основе симулација радног процеса мотора СУС | 1.5.     | 0867   |
| 3.         | Натпуњење мотора                            | 2.3..    | 0856   |
| 4.         | Конструкција мотора 2                       | 3.1.     | 1022   |
| 5.         | Бродски мотори                              | 3.3.     | 1025   |
| 6.         | Изабрана поглавља из области мотора СУС 1   | 3.4.     | 1026   |

Кандидат је био ангажован у пружању стручне помоћи студентском тиму „Формула студент“ на припремама за наступе на међународним такмичењима у сезони 2011–2012. У оквиру тих активности, током припреме и у раду са лабораторијском инсталацијом за испитивање такмичарског

мотора, уводио је студенте у проблематику испитивања мотора применом најсавременијих мерних техника као и у специфичности софтвера и апликација за дигиталну аквизицију података и обраду мерених величина са пробног стола за моторе. Такође, био је ангажован на развоју и оптимизацији апликативног софтвера за прикупљање, обраду и чување података са мерних ланаца пробног стола и електронске управљачке јединице, као и на самом извођењу испитивања и оптимизацији рада мотора.

Током лета 2012. године кандидат је похађао професионалну обуку за софтверско развојно окружење LMS AMESim у развојном центру компаније LMS Imagine у Минхену, Немачка.

Кандидат је активно учествовао у реализацији више од 10 дипломских радова пружајући студентима кроз консултације драгоцену помоћ у развоју разноврсних софтверских апликација и нумеричких симулација, као и у припреми инсталација за експериментална испитивања.

Посебно треба истаћи рад на развоју сложене платформе за експерименталну верификацију нове методе за динамичка испитивања перформанси мотора (SDS –Slow Dynamic Slope) која је кроз два мастер рада, реализована уз техничку подршку компаније AVL GmbH из Граца.

### 1.2.3. Списак објављених радова

#### 1.2.3.1. Научни радови у истакнутим међународним часописима, категорија M22

1. П. Мрђа, Н. Миљић, С. Поповић, **М. Китановић**, Continuous Slow Dynamic Slope Approach for Stationary Base Internal Combustion Engine Mapping, Thermal Science, online first only, doi: 10.2298/TSCI190308171M, 2019.
2. **М. Китановић**, С. Поповић, Н. Миљић, П. Мрђа, Numerical Analyses of a Hydraulic Hybrid Powertrain System for a Transit Bus, Thermal Science, online first only, doi: 10.2298/TSCI190308172K, 2019.

#### 1.2.3.2. Научни радови у међународним часописима, категорија M23

3. П. Мрђа, Н. Миљић, С. Поповић, **М. Китановић**, A method for quick estimation of engine moment of inertia based on an experimental analysis of transient working process, Thermal Science, Thermal Science, pp. 1215 - 1225, 2334-7163, doi: 10.2298/TSCI170915224M, 2017.
4. Н. Миљић, С. Поповић, П. Мрђа, **М. Китановић**, Slow Dynamic Slope method in IC engine benchmarking, Thermal Science, pp. 1271 - 1283, 2334-7163, doi: 10.2298/TSCI170921226M, 2017.

1.2.3.3. Рад у часопису међународног значаја верификованог посебном одлуком, категорија М24

5. **М. Китановић**, П. Мрђа, С. Поповић, Н. Миљић, A Thermodynamic Work Cycle Simulation of a Syngas-Fueled Engine, FME Transactions, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, 45, 4, pp. 572 - 577, 2406-128X, -1373257-, Belgrade, 2017.

1.2.3.4. Научни радови саопштени на скупу међународног значаја, штампани у целини, категорија М33

6. **М. Китановић**, С. Поповић, Н. Миљић, М. Цветић, М. Томић, П. Мрђа, Hydraulic Hybrid Technology Review – Perspectives and Benefits of its Implementation on Public Transportation Vehicles, 15th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia - Soko Banja, pp. 752 - 760, 978-86-6055-018-9, Република Србија, 18. - 21. Oct, 2011.
7. П. Мрђа, Н. Миљић, С. Поповић, **М. Китановић**, В. Петровић, Assesment of Fuel Economy Improvement Potential for a Hydraulic Hybrid Transit Bus, Green Design Conference, Proceedings, Proceedings, pp. 129 - 134, 978-90-365-3451-2, Босна и Херцеговина, 27. - 30. Sep, 2012.
8. **М. Китановић**, С. Поповић, Н. Миљић, М. Томић, П. Мрђа, A Simulation Study of the Effects of Turbo-Expansion Concept Implementation on Combustion and Gas-Exchange Processes of a 1.4 L Spark-Ignition Engine, International Congress Motor Vehicles & Motors 2012, pp. 147 - 158, 978-86-86663-91-7, Република Србија, 3. - 5. Oct, 2012.
9. Н. Миљић, М. Томић, С. Поповић, **М. Китановић**, П. Мрђа, Comparative Study on Combustion Features Extraction Methods in IC Engines Using Neural Networks Models, International Congress Motor Vehicles & Motors 2012, pp. 159 - 172, 978-86-86663-91-7, Република Србија, 3. - 5. Oct, 2012.
10. П. Мрђа, Н. Миљић, **М. Китановић**, С. Поповић, М. Томић, Model based approach in Yamaha R6 Formula Student Engine control parameters optimization, International Congress Motor Vehicles & Motors 2012, pp. 137 - 146, 978-86-86663-91-7, Република Србија, 3. - 5. Oct, 2012.
11. С. Поповић, М. Томић, Н. Миљић, **М. Китановић**, П. Мрђа, The Influence of Dynamic Engine Model Parameters on Crankshaft Instantaneous Angular Speed - Sensitivity and Error Analysis, International Congress Motor Vehicles & Motors 2012, pp. 173 - 185, 978-86-86663-91-7, Република Србија, 3. - 5. Oct, 2012.
12. **М. Китановић**, П. Мрђа, Петровић В., Н. Миљић, С. Поповић, М. Томић, A Simulation Study of Fuel Economy Improvement Potentials of a Transit Bus, Proceedings of the 24th International Automotive Conference Science and Motor Vehicles 2013, JUMV-SP-1301, pp. 56 - 67, 978-86-80941-38-7, Србија, 23. - 24. Apr, 2013.
13. С. Поповић, Н. Миљић, **М. Китановић**, П. Мрђа, М. Томић, High-Fidelity, Angle-Resolved Simulation Model for Predictions of Multi-Cylinder Engine Instantaneous Speed and Torque, Proceedings of the 11th International Conference on Accomplishments in Electrical and

- Mechanical Engineering and Information Technology (DEMI 2013), pp. 893 - 898, 978-99938-39-46-0, Босна и Херцеговина, 30. Мај - 01. Јун, 2013.
14. **М. Китановић**, С. Поповић, Н. Миљић, П. Мрђа, М. Томић, Simulation Study of a Transit Bus Equipped with an Ultracapacitor-Based Hybrid System, Proceedings of the 11th International Conference on Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology (DEMI 2013), pp. 943 - 948, 978-99938-39-46-0, Босна и Херцеговина, 30. Мај - 01. Јун, 2013.
  15. П. Мрђа, Петровић В., Н. Миљић, С. Поповић, **М. Китановић**, Combustion Parameters Calibration and Intake Manifold Redesign for Formula Student YAMAHA YZF-R6 Engine, Proceedings of the 11th International Conference on Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology (DEMI 2013), pp. 855 - 860, 978-99938-39-46-0, Босна и Херцеговина, 30. Мај - 01. Јун, 2013.
  16. Н. Миљић, С. Поповић, М. Томић, **М. Китановић**, П. Мрђа, Neural Networks Models Usage in Methods for Combustion Process Information Extraction in IC Engines, Proceedings of the 11th International Conference on Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology (DEMI 2013), pp. 917 - 922, 978-99938-39-46-0, Босна и Херцеговина, 30. Мај - 01. Јун, 2013.
  17. **М. Китановић**, П. Мрђа, С. Поповић, Н. Миљић, Fuel Economy Comparative Analysis of Conventional and Ultracapacitors-Based, Parallel Hybrid Electric Powertrains for a Transit Bus, International Congress Motor Vehicles & Motors 2014, pp. 258 - 267, 978-86-6335-010-6, Serbia, 9. - 10. Oct, 2014.
  18. П. Мрђа, В. Петровић, С. Ђинић, **М. Китановић**, Development of Continuously Variable Intake Manifold for Formula Student Racing Engine, International Congress Motor Vehicles & Motors 2014, pp. 326 - 339, 978-86-6335-010-6, Serbia, 9. - 10. Oct, 2014.
  19. С. Поповић, Н. Миљић, **М. Китановић**, Effective Approach to Analytical, Angle Resolved Simulation of Piston-Cylinder Friction in IC Engines, International Congress Motor Vehicles & Motors 2014, pp. 340 - 351, 978-86-6335-010-6, Serbia, 9. - 10. Oct, 2014.
  20. В. Марјановић, **М. Китановић**, С. Поповић, Н. Миљић, A Comparative Study on Performance of Conventional and Series Hybrid Power Train for Passenger Car in Taxi Service, International Congress Motor Vehicles & Motors 2014, pp. 352 - 362, 978-86-6335-010-6, Serbia, 9. - 10. Oct, 2014.
  21. Н. Миљић, С. Поповић, **М. Китановић**, Engine Crankshaft Speed Measurement Error Compensation, International Congress Motor Vehicles & Motors 2014, pp. 363 - 371, 978-86-6335-010-6, Serbia, 9. - 10. Oct, 2014.
  22. В. Петровић, С. Ђинић, **М. Китановић**, Н. Миљић, С. Поповић, Software and Hardware Challenges of Engine Test Bed Automation – Example of FME ICED Lab, 17th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, Proceedings, pp. 1062 - 1065, ISBN 978-86-6055-076-9, Soko Banja, Srbija, 20. - 23. Oct, 2015.

23. М. Томић, З. Јовановић, **М. Китановић**, Energetic and Ecological Aspects of the Application of Electric Drive Vehicles in Serbia, 17th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, Proceedings, pp. 948 - 956, ISBN 978-86-6055-076-9, Soko Banja, Srbija, 20. - 23. Oct, 2015.
24. **М. Китановић**, С. Поповић, Н. Миљић, П. Мрђа, Dynamic Programming Study of a Hybrid Electric Powertrain System for a Transit Bus, 18th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, Proceedings, pp. 988 - 997, 978-86-6055-098-1, Soko Banja, Serbia, 17. - 20. Oct, 2017.
25. П. Мрђа, Н. Миљић, С. Поповић, **М. Китановић**, Ignition Timing Map Calibration Based on Nonlinear Dynamic System Identification using NARX Neural Network, Proceedings of 18th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, pp. 685 - 693, 978-86-6055-098-1, Soko Banja, Srbija, 17. - 20. Oct, 2017.

#### 1.2.3.5. Рад у часопису националног значаја, категорија M52

26. **М. Китановић**, П. Мрђа, С. Поповић, Н. Миљић, Fuel Economy Comparative Analysis of Conventional and Ultracapacitors-Based, Parallel Hybrid Electric Powertrains for a Transit Bus, Mobility & Veh Mechanics, Факултет инжењерских наука, 40, 3, pp. 71 - 84, 1450-5304, 629.341, 2014.
27. С. Поповић, Н. Миљић, **М. Китановић**, Effective Approach to Analytical, Angle Resolved Simulation of Piston–Cylinder Friction in IC Engines, Mobility & Veh Mechanics, Факултет инжењерских наука, 41, 2, pp. 35 - 51, 1450-5304, 536.8, 2015.
28. Н. Миљић, С. Поповић, **М. Китановић**, Engine Crankshaft Speed Measurement Error Compensation, Mobility & Veh Mechanics, Факултет инжењерских наука, 41, 3, pp. 41 - 51, 1450-5304, 621.431.73:53.088.6, 2015.
29. П. Мрђа, Петровић В., Ђинић С., **М. Китановић**, Development Of Continuously Variable Intake Manifold For Formula Student Racing Engine, Mobility & Vehicle Mechanics, Факултет инжењерских наука, 41, 3, pp. 21 - 38, 1450-5304, 62.843.4:[519.673], 2015.

#### 1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Током докторских студија Марко Н. Китановић, маг. инж. маш. студент Докторских студија, положио је све испите предвиђене планом докторских студија (45 ЕСПБ) који укључују и лабораторијски рад (53 ЕСПБ) и одбрану пројекта идеје докторске дисертације (22 ЕСПБ) што у укупном износу даје 120 ЕСПБ бодова чиме је остварио услов да му се одобри израда докторске дисертације.

Током својих досадашњих истраживачких активности, кандидат је показао посебну заинтересованост, афинитет и способност за научно истраживачки рад у области машинства, којој припада предложена тема докторске дисертације.

Досадашњи објављени радови у међународним и домаћим часописима, радови презентовани на научним скуповима, суштински су повезани са научном облашћу којој припада предложена тема докторске дисертације и квалификују кандидата за успешан рад на предложеној теми.

## **2. Предмет и циљ истраживања**

Погонски системи савремених возила предмет су истраживања великог броја научника широм света. Основни циљ тих истраживања огледа се у изналажењу нових начина за задовољавање све сложенијих и оштријих законских одредби у погледу токсичне издувне емисије и смањења потрошње горива, уз задржавање повољних перформанси возила. Уназад неколико деценија приметна је повећана пажња истраживача према алтернативним погонским системима, а нарочито према хибридним погонским системима који, поред мотора са унутрашњим сагоревањем, обухватају и додатну погонску машину и алтернативни акумулатор енергије.

Комунална возила, као што су возила градске чистоће и возила јавног превоза, су високо-специјализована возила која основни задатак, као што су одношење смећа, односно превоз путника по унапред дефинисаним трасама и терминима, обављају ефикасније од возила за опште намене. Централизација у овом случају има и повољне ефекте са аспекта унапређења економичности јер повећање масе возила погодује примени одређених решења хибридних погонских система које карактерише висока специфична снага (код, на пример, хидрауличких хибридних система).

Један од највећих изазова који треба превазићи ради већег пробоја хибридних погонских система јесте оптимизација функционалних и управљачких параметара система. Функционални параметри хибридног погонског система подразумевају енергетске капацитете акумулатора енергије, претварача енергије (мотори/генератори код електричних хибридних система, мотори/пумпе код хидрауличких хибридних погонских система), као и диспозицију алтернативног погонског система и преносне односе између конвенционалне и алтернативне погонске машине. Оптимални функционални параметри зависе од масе и носивости возила, возног циклуса (профила брзине и убрзања, конфигурације терена, итд.) и као такви представљају компромис за одређени скуп утицајних фактора који су најчешће присутни код објекта оптимизације.

Са друге стране, постојање додатне погонске машине и алтернативног акумулатора енергије условљава потребу оптимирања управљачких параметара хибридног система. Наиме, за сваки тренутак и захтевано оптерећење погонског система, потребно је установити оптималну расподелу оптерећења између мотора СУС и додатне погонске машине ради смањења укупне потрошње горива током разматраног возног циклуса и најефикаснијег искоришћења енергије добијене у фазама регенеративног кочења возила.

Поменути проблеми оптимизације могу се релативно лако решавати уз помоћ неких од познатих, проверених робусних математичких метода, попут динамичког програмирања. Један од недостатака

динамичког програмирања јесте релативно дуго време решавања алгоритма, које експоненцијално расте са бројем стања система. Са друге стране, предност ове методе јесте у томе што се решавањем рекурзије добија глобално оптимално решење оптимизације, што је основни разлог зашто динамичко програмирање и даље представља једно од најбољих решења за оптимизацију управљања код хибридних погонских система. Поред свега побројаног, главни недостатак рекурзивних метода огледа се у томе што се процес оптимизације, услед потребе да се целокупан проблем унапред дефинише, не може одвијати у реалном времену. Другим речима, на овај начин добијени резултат оптимизације не може се превести у алгоритам управљања и применити на разматраном објекту. Ова чињеница отвара простор за велики број истраживања са циљем примене резултата „off-line” оптимизације и извођења алгоритма управљања који ће применом на разматраном објекту резултирати перформансама које теже оптималним.

Предмет ове дисертације јесте истраживање у области оптимизације хибридног погонског система за тешка возила применом метода динамичког програмирања и математичких модела заснованих на вештачким неуронским мрежама, на основу експериментално добијених података са возила јавног градског превоза.

Научни циљеви дисертације су следећи:

- Развој хардверске конфигурације и софтверске апликације за аутономну аквизицију података на возилу јавног градској превоза у стварним експлоатационим условима.
- Развој метода и програма за обраду и анализу снимљених података.
- Развој метода за анализу параметара возног циклуса у погледу утицаја саобраћајних застоја на одвијање превоза.
- Развој програма и калибрација модела за симулацију конвенционалних погонских система на основу снимљених и обрађених података.
- Развој програма и модела за симулацију хибридних погонских система заснованих на електричним и хидрауличким уређајима за погон и складиштење енергије.
- Примена решења за оптимизацију функционалних и управљачких параметара хибридног погонског система употребом методе динамичког програмирања.
- Развој методе за извођење алгоритма управљања из резултата оптимизације динамичког програмирања, засноване на примени неуронских мрежа.
- Примена изведеног алгоритма управљања на модел хибридног погонског система и оцена и поређење перформанси у односу на оптималне перформансе хибридног погонског система добијене применом динамичког програмирања.

## 2.1. Релевантни библиографски извори

Знатан број радова [1, 2, 3] објављен је на тему примене и оптимизације хибридних погонских система код тешких возила, који потврђују велику сложеност и деликатност у процесу одабира функционалних параметара система као и оптимизације управљања.

У раду [1] формиран је симулациони модел паралелног хидрауличног хибридног погонског система намењеног погону средње тешког доставног возила. Употребом динамичког програмирања, извршена је оптимизација управљачких параметара - расподеле оптерећења између мотора СУС и хидрауличне машине, као и степена преноса. Употребљен је један хидро-пнеуматски акумулатор радне и укупне запремине од 50 и 100 dm<sup>3</sup>, респективно. Извршена је оптимизација система за само један притисак преднапрезања акумулатора од 125 bar. Коришћен је аналитички модел акумулатора где је стање гаса описано Првим законом термодинамике и једначином стања реалног гаса. Анализом оптималне путање стања система, изведен је једноставан закон управљања који користи унапред дефинисана правила на основу тренутног стања напуњености хидро-пнеуматског акумулатора и траженог оптерећења погонског система.

У раду [2] анализиран је погонски систем за возило намењено одношењу комуналног отпада. Моделиран је паралелни хидраулички хибридни погонски систем који обухвата дизел-мотор и хидрауличну машину која је постављена иза мењачког преносника. Користи се аналитички модел хидро-пнеуматског акумулатора (укупне запремине од 32 dm<sup>3</sup>) који је базиран на примени Првог закона термодинамике и Бенедикт-Веб-Рубинове (Benedict-Webb-Rubin) једначине стања реалног гаса. Ни у овом раду није анализиран утицај функционалних параметара (притиска преднапрезања, масе еластомерне пене и запремине акумулатора) на степен корисности самог акумулатора или на систем у целини. За оптимизацију и формирање управљачког сигнала употребљена је метода стохастичког динамичког програмирања, где је укупно оптерећење погонског система моделиран као Марковљев процес. Оптимална решења су дискретизована и формирано је укупно 16 мапа које у функцији стања напуњености акумулатора, траженог оптерећења погонског система и брзине кретања возила дају оптималну расподелу оптерећења хибридног система.

У раду [3] разматран је проблем оптимизације управљања хидрауличног хибридног погонског система намењеног вишенаменском теренском возилу. Формиран је симулациони модел возила и хидрауличног система који је серијски спрегнут са мотором са унутрашњим сагоревањем. Коришћен је аналитички модел хидро-пнеуматског акумулатора уз помоћ кога је извршена анализа утицаја термалне временске константе и масе еластомерне пене на степен корисности самог акумулатора. Међутим, није извршена анализа ових параметара на степен корисности целокупног погонског система, нити је разматран утицај масе гаса, тј. притиска преднапрезања на учинак акумулатора и система. Коришћен је акумулатор укупне запремине од 86 dm<sup>3</sup> и узето је да је притисак преднапрезања 125 bar.

Посебан проблем код хидрауличких хибридних погонских система огледа се у што ефикаснијој употреби малих енергетских капацитета хидро-пнеуматских акумулатора. Мали број истраживања је посвећен проблематици оптимизације функционалних параметара тих акумулатора и утврђивања утицаја појединих радних параметара истих на укупни степен корисности погонског система.

У највећем броју случајева, за одређивање оптималног управљања користи се метода динамичког програмирања. Сама метода, иако настала током педесетих година прошлог века [4], и данас се користи за успостављање оптималног алгоритма управљања на основу постављеног проблема, граничних услова и критеријума оптимизације. Нажалост, највећи недостатак ове методе јесте немогућност примене на објектима чије функционисање је потребно оптимизирати у реалном времену јер је један од потребних услова познавање стања система у читавом временском домену оптимизације. Због немогућности поузданог предвиђања будућих стања погонског система током кретања возила, немогуће је постићи апсолутну оптимизацију у реалном времену већ само težити глобалном оптимуму. Од метода за оптимизацију погонског система које је могуће применити на возилима и за чији рад је потребно познавање стања система само до тренутка одлучивања („on-line“ оптимизација), користе се методе засноване на унапред дефинисаним правилима [5] („rule-based control“), које подразумевају термостатске контроле, управљања која користе мапе добијене извођењем правила из оптималних алгоритама управљања, итд. Такође, методе засноване на фазизи (fuzzy logic) [6], као и ECMS [7] (Equivalent Consumption Minimization Strategy) спадају у ову групу метода. Другу велику групу примењивих метода за управљање хибридни погонским системима чине методе које се заснивају на предвиђању будућих стања система на основу тренутних и претходно успостављених, које даље омогућавају примену оптимизације управљања у реалном времену. У ове методе спадају опште MPC (Model-Predictive Control), као и стохастичко динамичко програмирање (Stochastic Dynamic Programming) и остале методе које користе Марковљеве ланце (Markov chains). Поред тога што су перформансе оптимизације ових метода понекад и знатно слабије од референтних, непримењивих (попут динамичког програмирања), неке од њих релативно лако превазилазе могућности практичне примене на управљачким системима при повећању сложености модела на којим су засноване.

Идеја ове докторске дисертације јесте да се кроз експериментално и теоријско истраживање омогући утврђивање утицаја функционалних параметара хидро-пнеуматског акумулатора на стање хибридног погонског система и испита могућност примене метода заснованих на неуронским мрежама [8] у процесу извођења и примене оптималног алгоритма управљања. Наиме, на основу података прикупљених са возила јавног градског превоза које саобраћа у реалним експлоатационим условима, могуће је формирати калибрисане моделе конвенционалног погонског система и надаље их надоградити моделима алтернативних погонских машина и додатног акумулатора енергије и тако формирати моделе хибридног погонског система за разматрано возило. Формирањем аналитичког модела хидро-пнеуматског акумулатора, омогућено је утврђивање и детаљна анализа утицаја притиска преднапрезања (маса гаса), радне запремине и масе еластомерне пене на степен корисности

самог акулуматора, као и на хибридни погонски систем као целину, кроз разматрање укупног остваривог потенцијала у апсорбовању и складиштењу енергије кочења. На основу свих ових модела, као и коришћењем различитих класа возних циклуса (за различите услове саобраћаја, попут оптерећења трасе аутобуса, броја путника у аутобусу, итд.) добијених током експерименталног истраживања, могуће је извршити глобалну оптимизацију управљања за различите услове саобраћаја употребом динамичког програмирања. Тај скуп података би се даље употребио за тренирање неуронских мрежа са циљем извођења управљачког алгоритма. Крајњи циљ дисертације био би утврђивање остваривог учинка хидрауличког хибридног погонског система у реалним експлоатационим условима.

- [1] Wu, B., et al., Optimal Power Management for a Hydraulic Hybrid Delivery Truck, *Vehicle System Dynamics*, 42 (2004), 1-2, pp. 23-40
- [2] Johri, R., et al., Simultaneous Optimization of Supervisory Control and Gear Shift Logic for a Parallel Hydraulic Hybrid Refuse Truck Using Stochastic Dynamic Programming, *ASME 2011 Dynamic Systems and Control Conference and Bath/ASME Symposium on Fluid Power and Motion Control*, Volume 1, 99–106, Arlington, Virginia, USA
- [3] Filipi, Z., Kim, Y. J. Hydraulic Hybrid Propulsion for Heavy Vehicles: Combining the Simulation and Engine-In-the-Loop Techniques to Maximize the Fuel Economy and Emission Benefits, *Oil & Gas Science and Technology*, 65 (2010), pp. 155–178
- [4] Bellman, R. E., Dreyfus, S. E.: “Applied Dynamic Programming”, Princeton University Press, 1962
- [5] Lin, C.C., et al., Modelling and control of a medium-duty hybrid electric truck, *Int. J. Veh. Des.*, 11 (2004), pp. 349–370
- [6] Abdelsalam, A., Cu, S., A Fuzzy Logic Global Power Management Strategy for Hybrid Electric Vehicles Based on a Permanent Magnet Electric Variable Transmission, *Energies*, 5 (2012), pp. 1175–1198
- [7] Sciarretta, A., et al., Optimal Control of Parallel Hybrid Electric Vehicles, *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 12 (2004), pp. 352–363
- [8] Hagan, M.T., et al., “Neural Network Design”, Martin Hagan, 2014

### 3. Полазне хипотезе

- Спровођењем свеобухватног, вишедневног експеримента прикупљања података са возила јавног градског превоза у реалним експлоатационим условима могуће је прикупити све релевантне погонске параметре и профиле возних циклуса у разноврсним и најчешће присутним условима саобраћаја.

- На основу анализе снимљених података, могуће је расподелити возне циклусе у различите класе према експлоатационим условима (оптерећења траса, раскрсница, број путника у аутобусу, итд.). На тај начин ће бити могуће формирање сетова података за тренирање и проверу неуронских мрежа, као и оцена предложене методе извођења алгоритма управљања наспрам референтне методе (динамичко програмирање).
- Анализом прикупљених података са CAN мреже возила могуће је извршити идентификацију параметара конвенционалног погонског система која ће омогућити реализацију калибрисаног модела возила над којим ће се вршити експерименти. Потребно је дефинисати, тј. идентификовати мапе мотора (спољна брзинска карактеристика момента, универзална мапа специфичне ефективне потрошње горива), преносног механизма (карактеристике хидродинамичке спојнице, преносне односе мењача), као и коефицијенте отпора котрљања, аеродинамичког отпора и остале.
- Надоградњом калибрисаног модела конвенционалног погонског система математичким моделима машина за погон и складиштење енергије добија се исправан репрезент хибридне варијанте предметног возила.
- Спровођењем алгоритма динамичког програмирања над моделом хибридног погонског система са различитим вредностима функционалних параметара могуће је идентификовати оптималне параметре разматране конфигурације хибридног погонског система за предметно возило и возни циклус.
- Варијацијом подешавања рекурентне неуронске мреже могуће је успешно извршити процес тренирања и провере мреже тако да се за разматрани возни циклус и конфигурацију хибридног погонског система добије ток управљачког параметра који опонаша промену истог применом алгоритма динамичког програмирања. Циљ јесте да се за сет података за тренирање неуронске мреже употребе резултати процеса оптимизације добијени применом динамичког програмирања на различитим класама возних циклуса (снимљени у различитим условима експлоатације) и да се на тај начин покуша извести примењиви алгоритам управљања који се по перформансама приближава оптималним и то при различитим условима саобраћаја.

#### **4. Научне методе истраживања**

За остваривање научних циљева дисертације користе се следеће методе:

- Експерименталне методе – Испитивање конвенционалног погонског система возила јавног градског превоза у реалним експлоатационим условима. Потребно је прикупити и складиштити све поруке са J1939 CAN мреже током вишедневног испитивања. Од кључног значаја су поруке које се тичу потрошње горива (LFE), брзине кретања возила (CCVS), броја

обртаја мотора и оптерећења мотора (EESC1), тренутног степена преноса мењача (ETC2). Поред података са CAN мреже, потребно је пратити промену масе возила током експеримента и на тај начин бележити оптерећење возила. Промена масе може се посредно пратити преко оптерећења система ослањања возила уградњом давача притиска. Такође, потребно је пратити и бележити локацију возила током експлоатације ради извођења возног циклуса и одређивања нагиба пута дуж разматране трасе.

- Методе статистичке и динамичке анализе измерених сигнала.
- Методе математичког моделирања погонских система.
- Нумеричке методе оптимизације управљања употребом динамичког програмирања.
- Методе математичког моделирања оптималног управљачког сигнала применом вештачких неуронских мрежа.

## 5. Очекивани научни допринос

Истраживање у оквиру докторске дисертације даће следећи научни допринос:

Формирањем детаљног симулационог модела хидрауличког хибридног погонског система, биће омогућено одређивање утицаја масе еластомерне пене, притиска преднапрезања и радне запремине хидро-пнеуматског акумулатора на степен корисности погонског система у целини.

Поред самог енергетског капацитета и параметара који се односе на топлотне губитке акумулатора, утврдиће се зависност маса гаса и еластомерне пене на максимално достижни степен корисности хибридног погонског система. Наиме, поред тога што је ефикасност хидро-пнеуматских акумулатора врло висока и неретко достиже вредности изнад 95%, повећање учинка целокупног хибридног погонског система у датим експлоатационим околностима и за задате реалне граничне услове могуће је постићи и избором параметара који доводе до смањења степена корисности акумулатора. Истраживањем у оквиру ове дисертације биће утврђена веза између свих релевантних параметара акумулатора и минимално оствариве потрошње горива, чиме ће бити омогућена оптимизација функционалних параметара хидрауличког хибридног погонског система.

## 6. План и структура истраживања

На основу до сада спроведених припремних истраживачких активности, планирано истраживање ће обухватити следеће основне групе активности:

- Преглед и анализа радова у референтној области.
- Преглед и систематизација постојећег стања истраживања у области хибридних погонских система са посебним освртом на тематику оптимизације функционалних и управљачких параметара система.

- Реализација и тестирање хардверског решења и апликације за аутономно прикупљање података са возила јавног градског превоза.
- Експериментално испитивање конвенционалног погонског система аутобуса градског превоза у стварним експлоатационим условима. Аквизиција свих релевантних погонских параметара, масе возила и GPS података у току испитивања. Ово испитивање се врши у циљу прикупљања података који ће служити као референтни сет података за реализацију наредних фаза испитивања.
- Развој метода и софтверског решења за синхронизацију, обраду прикупљених канала, формирање сетова возних циклуса и идентификацију универзалне мапе специфичне ефективне потрошње мотора, карактеристика хидродинамичке спојнице, итд.
- Развој симулационог модела конвенционалног погонског система аутобуса. Калибрација модела према снимљеним подацима употребом генетског алгоритма.
- Формирање математичких модела погонске машине и акумулатора енергије хибридног погонског система и надоградња референтне симулације.
- Имплементација симулационог модела хибридног погонског система у оквир за спровођење оптимизације функционалних и управљачких параметара применом методе динамичког програмирања.
- Извођење алгоритма управљања из резултата оптимизације динамичког програмирања применом вештачких неуронских мрежа. Оцена предложене методе упоређивањем резултата динамичког програмирања и примењеног алгоритма управљања изведеног вештачким неуронским мрежама.

## 7. Закључак и предлог

На основу изложене анализе пријаве теме кандидата Марка Н. Китановића, маг. инж. маш., студента Докторских студија, Комисија за оцену подобности и научне заснованости теме закључује да је кандидат успешно положио све испите предвиђене планом усавршавања и објавио значајан број научних радова. Комисија закључује да је предложена тема изузетно актуелна и подобна за израду докторске дисертације, као и да кандидат испуњава све предвиђене услове прописане Законом о високом образовању и Статутом Машинског факултета и да има истраживачке способности за рад на докторској дисертацији.

Имајући у виду све наведено, Комисија предлаже Већу докторских студија Машинског факултета Универзитета у Београду да се кандидату Марку Н. Китановићу, маг. инж. маш., студенту Докторских студија Машинског факултета Универзитета у Београду, одобри израда докторске дисертације под називом:

**„Оптимизација функционалних и управљачких параметара хибридног погонског система  
возила јавног градског превоза“**

која припада области техничких наука – машинство, ужој научној области – Мотори СУС, за које је машински факултет Универзитета у Београду матичан. За ментора дисертације предлаже се др Слободан Ј. Поповић, ванредни професор на Катедри за моторе Машинског факултета Универзитета у Београду.

Београд, 02.02.2021. год.

### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

---

др Слободан Ј. Поповић, ванредни професор, ментор  
Универзитет у Београду – Машински факултет

---

др Ненад Л. Миљих, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Машински факултет

---

др Јован Ж. Дорић, ванредни професор  
Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука

Додатак уз образац 1.

## ПОДАЦИ О МЕНТОРУ

Име и презиме: проф. др Слободан Ј. Поповић

Звање: ванредни професор

Списак радова објављених у научним часописима са Science Citation Index (SCI) листе који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. Mrđa P.D., Miljić N.L., Popović S.J., Kitanović M.N.: Continuous Slow Dynamic Slope Approach for Stationary Base Internal Combustion Engine Mapping, Thermal Science, Volume 24, Issue 1 Part A, Pages: 147-158, doi: 10.2298/TSCI190308171M, ISSN: 0354-9836, 2020. (IF=1,547 за 2019.)
2. Kitanović M.N., Popović S.J., Miljić N.L., Mrđa P.D.: Numerical Analyses of a Hydraulic Hybrid Powertrain System for a Transit Bus, Thermal Science, Volume 24, Issue 1 Part A, Pages: 159-170, doi: 10.2298/TSCI190308172K, ISSN: 0354-9836, 2020. (IF=1,574 за 2019.)
3. Mrđa P.D., Miljić N.L., Popović S.J., Kitanović M.N.: A method for quick estimation of engine moment of inertia based on an experimental analysis of transient working process, Thermal Science, Volume 22, Issue 3, Pages: 1215-1225, doi: 10.2298/TSCI170915224M, ISSN: 0354-9836, 2018. (IF=1,541 за 2018.)
4. Miljić N.L., Popović S.J., Mrđa P.D., Kitanović M.N.: Slow Dynamic Slope method in internal combustion engine benchmarking, Thermal Science, Volume 22, Issue 3, Pages: 1271-1283, doi: 10.2298/TSCI170921226M, ISSN: 0354-9836, 2018. (IF=1,541 за 2018.)
5. Popović S.J., Tomić M.V.: Possibilities to identify engine combustion model parameters by analysis of the instantaneous crankshaft angular speed, Thermal Science, Volume 18, Issue 1, Pages: 97-112, doi: 10.2298/TSCI120907006P, ISSN: 0354-9836, 2014. (IF=1,222 за 2014.)

*(навести најмање један рад у случају менторства дисертације која се пријављује до 31.12.2008. године, односно најмање три рада у случају менторства дисертације која се пријављује у периоду од 1.01.2009. до 31.12.2009. године, односно најмање пет радова у случају менторства дисертације која се пријављује почев од 1.01.2010. године)*

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

---