

Факултет МАШИНСКИ

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

254/2
(Број захтева)Већу научних области техничких наука(Назив стручног већа коме се захтев упућује, сагласно
Члану 6. и чл. 7 став 1. овог Правилника)13.02.2020.
(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

ПОВЕЋАЊЕ ЕФИКАСНОСТИ ИСПИТИВАЊА МОТОРА СУС ПРИМЕНОМ ДИНАМИЧКИХ МЕТОДА

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ Мотори СУС

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

- Име, име једног родитеља и презиме кандидата: ПРЕДРАГ (ДРАГОСЛАВ) МРЂА
- Назив и седиште Факултета на коме је стекао високо образовање: Машински факултет Београд
- Година дипломирања: 2010.
- Назив магистарске тезе кандидата: _____
- Назив Факултета на коме је магистарска теза одбрањена: _____
- Година одбране магистарске тезе: _____
- 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 13.02.2020.
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: 254/2
Датум: 13.02.2020. године
Београд, Краљице Марије 16

На основу захтева студента **Предрага Мрђе**, маст. инж. маш., бр. 1078/1 од 10.06.2019. године да му се одобри израда докторске дисертације, реферата Комисије у саставу: др Ненад Миљић, ванр. проф., ментор, др Слободан Поповић, ванр. проф. и др Јован Дорић, ванр. проф., Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, број 254/1 од 11.02.2020. 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 13.02.2020. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Прихвата се научна заснованост теме докторске дисертације и констатује да студент **ПРЕДРАГ МРЂА**, маст. инж. маш. испуњава услове за израду докторске дисертације **«ПОВЕЋАЊЕ ЕФИКАСНОСТИ ИСПИТИВАЊА МОТОРА СУС ПРИМЕНОМ ДИНАМИЧКИХ МЕТОДА»**.

За ментора студенту **Предрагу Мрђи**, именује се **др Ненад Миљић, 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 **Предрага Мрђе** за израду докторске дисертације

Одлуком Научно-наставног већа бр. 1078/3 од 04.07.2019. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Предрага Мрђе, маг. инж. маш. студента Докторских студија на Машинском факултету Универзитета у Београду, за израду докторске дисертације и научне заснованости теме „Повећање ефикасности испитивања мотора СУС применом динамичких метода“.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

РЕФЕРАТ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Предраг Мрђа је рођен 30.05.1986. године у Београду. Основно образовање завршио је у Београду 2001. године, након којег уписује природно-математички смер Четврте гимназије у Београду. Након одбране матурског рада из Физике под насловом „Мотори СУС“, 2005. године уписује Основне академске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду. Завршни испит положио је 18.09.2008. са оценом 10 одбравивши завршни рад на тему „Уравнотежење инерцијалних сила и момената код мотора са унутрашњим сагоревањем“ из предмета Мотори СУС. Исте године уписује Дипломске академске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду на модулу Мотори СУС. Мастер студије завршио је 20.10.2010., са укупном просечном оценом током студија 9,70, одбравивши завршни рад на тему „Моделски заснована калибрација управљачких параметара мотора са унутрашњим сагоревањем“, из предмета Испитивање мотора, на Катедри за моторе, Машинског факултета Универзитета у Београду. Ментор завршног рада на мастер студијама је био доц. др Милош Цветић. Докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду уписао је 2010. године. Потенцијални ментор докторске дисертације је в. проф. др Ненад Миљић. Од 1.1.2011. је запослен је на Машинском факултету у Београду као сарадник на пројекту Технолошког развоја „Истраживање и развој алтернативних погонских система и горива за градске аутобусе и комунална возила ради побољшања енергетске ефикасности и еколошких карактеристика“, који финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије: ТР-35042, чији је руководилац проф. др Мирољуб Томић. Од 11.07.2013. запослен је на Машинском факултету у Београду као асистент на катедри за Моторе.

Током студија добијао је следеће похвале поводом Дана Машинског факултета:

- Похвала Машинског факултета за одличан успех на трећој години Основних академских студија (ШК 2007/2008) и положене све испите са просечном оценом 9.36.

- Похвала Машинског факултета за одличан успех на првој години Дипломских академских студија (ШК 2008/2009) и положене све испите са просечном оценом 9.40.
- Похвала Машинског факултета за одличан успех на другој години Дипломских академских студија (ШК 2009/2010) и положене све испите са просечном оценом 10,00.

Кандидат се служи следећим програмским пакетима: MathWorks MATLAB, National Instruments LabVIEW, AVL Concerto, ETAS INCA, Ricardo WAVE, LyX/LaTeX и DSS SolidWorks. Кандидат влада енглеским језиком.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

1.2.1. Преглед положених испита

Предраг Мрђа је уписао Докторске академске студије на Машинском факултету 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	Аналитичка механика	проф. др Зоран Митровић	1/5	10
5	Мерења помоћу рачунара	проф. др Мирољуб Томић	2/5	10
6	Моделирање радног процеса мотора - напредне технике	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 1	проф. др Милорад Милованчевић	1/10	10
11	Истраживање и публикавање 2	проф. др Милорад Милованчевић	2/15	10
12	Истраживање и публикавање 3	проф. др Ненад Миљић	3/20	10
13	Истраживање и публикавање 4	проф. др Слободан Поповић	4/8	10
14	Пројекат идеје докторске дисертације	проф. др Ненад Миљић проф. др Слободан Поповић доц. др Драган Кнежевић	4/22	10

1.2.2. Учешће у извођењу наставе

Школске 2011/2012. године на Машинском факултету Универзитета у Београду кандидат је, у статусу студента Докторских студије, учествовао у извођењу аудиторних вежби на Катедри за моторе из предмета Конструкција аутомобилских мотора - Увод (ОАС), Хибридни погонски системи (ОАС) и Мерења помоћу рачунара (МАС). Од тренутка запослења на Машинском факултету у звању асистента на Катедри за моторе 11.07. 2013., кандидат активно учествује у

настави у извођењу аудиторних вежби на Основним и Мастер академским студијама, и то из следећих предмета: Конструкција мотора 1, Мехатроника мотора, Сензори и мерења помоћу рачунара, Моделски заснован развој аутомобилског софтвера, Формирање смеше и сагоревање у моторима СУС, Мотори СУС, Мотори СУС - М, Испитивање мотора, Екологија мобилних извора снаге, Изабрана поглавља из области мотора СУС 2, Стручна пракса М - МОТ, Стручна пракса Б - МОТ и Пројекат мотора.

1.2.3. Учешће на стручним такмичењима

Кандидат је активно учествовао на пројекту међународног Универзитетског такмичења „Формула Студент“ тима Универзитета у Београду 2012., 2013., 2014. и 2016. године. У почетним фазама развоја погонског система возила формуле студент, докторанд је био главни инжењер за постављање система пробног стола, испитивање и оптимизацију управљачких параметара мотора. У такмичарској сезони 2013. године, у својству ментора подтима за погон, предводио је групу студената у процесу пројектовања и израде система погонске групе. У 2014. години кандидат је био вођа формула студент тима Универзитета у Београду. Такмичења на којима је тим наступао за време ангажовања докторанда на овом пројекту су:

- Formula ATA, Италија, 2012., 2013., 2014. и 2016. године,
- FS Czech, Република Чешка, 2013. године,
- FSH, Мађарска, 2013. и 2016. године,
- FSA, Аустрија, 2014. године.

Кандидат је учествовао на такмичењу из NI LabVIEW програмирања на Електротехничком факултету Универзитета у Београду 2011. и 2012. године.

1.2.4. Списак објављених радова

1.2.4.1. Научни радови у истакнутим међународним часописима, категорије M22

1. **Mrda P.**, Miljić N., Popović S., Kitanović M.: *Continuous Slow Dynamic Slope Approach for Stationary Base Internal Combustion Engine Mapping*, Thermal Science, online first only, doi: 10.2298/TSCI190308171M, ISSN: 0354-9836, 2019. (IF=1.541 за 2018.)
2. Kitanović M., Popović S., Miljić N., **Mrda P.**: *Numerical Analyses of a Hydraulic Hybrid Powertrain System for a Transit Bus*, Thermal Science, online first only, doi: 10.2298/TSCI190308172K, ISSN: 0354-9836, 2019. (IF=1.541 за 2018.)

1.2.4.2. Научни радови у међународним часописима, категорије M23

3. **Mrda P.**, Miljić N., Popović S., Kitanović M.: *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., Popović S., **Mrda P.**, Kitanović M.: *Slow Dynamic Slope method in IC engine benchmarking*, Thermal Science, Volume 22, Issue 3, Pages: 1271-1283, doi: 10.2298/TSCI170921226M, ISSN: 0354-9836, 2018. (IF=1.541 за 2018.)

- 1.2.4.3. Рад у часопису међународног значаја верификованог посебном одлуком, категорија M24
5. Kitanović M., **Mrđa P.**, Popović S., Miljić N.: *A Thermodynamic Work Cycle Simulation of a Syngas-Fueled Engine*, FME Transactions, Volume 45, No 4, pp. 572-577, doi: 10.5937/fmet1704572K, ISSN: 1451-2092, 2017.
- 1.2.4.4. Научни радови саопштени на скупу међународног значаја, штампани у целини, категорија M33
6. Kitanović M., Popović S., Miljić N., Cvetić M., Tomić M., **Mrđa P.**: *Hydraulic Hybrid Technology Review - Perspectives and Benefits of its Implementation on Public Transportation Vehicles*, 15th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, pp. 752 - 760, 978-86-6055-018-9, Soko Banja, Srbija, 18. - 21. Oct, 2011.
 7. **Mrđa P.**, Miljić N., Popović S., Kitanović M., Petrović V.: *Assesment of Fuel Economy Improvement Potential for a Hydraulic Hybrid Transit Bus*, Green Design Conference, Proceedings, pp. 129 - 134, 978-90-365-3451-2, Bosna i Hercegovina, 27. - 30. Sep, 2012.
 8. Kitanović M., Popović S., Miljić N., Tomić M., **Mrđa P.**: *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, Srbija, 3. - 5. Oct, 2012.
 9. Miljić N., Tomić M., Popović S., Kitanović M., **Mrđa P.**: *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, Srbija, 3. - 5. Oct, 2012.
 10. **Mrđa P.**, Miljić N., Kitanović M., Popović S., Tomić M.: *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, Srbija, 3. - 5. Oct, 2012.
 11. Popović S., Tomić M., Miljić N., Kitanović M., **Mrđa P.**: *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, Srbija, 3. - 5. Oct, 2012.
 12. Kitanović M., **Mrđa P.**, Petrović V., Miljić N., Popović S., Tomić M.: *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, Srbija, 23. - 24. Apr, 2013.
 13. Popović S., Miljić N., Kitanović M., **Mrđa P.**, Tomić M.: *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, Bosna i Hercegovina, 30. May - 01. Jun, 2013.
 14. Kitanović M., Popović S., Miljić N., **Mrđa P.**, Tomić M.: *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, Bosna i Hercegovina, 30. May - 01. Jun, 2013.
 15. **Mrđa P.**, Petrović V., Miljić N., Popović S., Kitanović M.: *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, Bosna i Hercegovina, 30. May - 01. Jun, 2013.

16. Miljić N., Popović S., Tomić M., Kitanović M., **Mrda P.**: *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, Bosna i Hercegovina, 30. May - 01. Jun, 2013.
17. Kitanović M., **Mrda P.**, Popović S., Miljić N.: *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. **Mrda P.**, Petrović V., Đinić S., Kitanović M.: *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. Đinić S., Petrović V., **Mrda P.**, Popović S., Miljić N.: *Light Vehicles Test Procedures on an Automated Engine Test Bed*, 17th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, Proceedings, pp. 1056 - 1061, ISBN 978-86-6055-076-9, Soko Banja, Srbija, 20. - 23. Oct, 2015.
20. Kitanović M., Popović S., Miljić N., **Mrda P.**: *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.
21. **Mrda P.**, Miljić N., Popović S., Kitanović M.: *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.

1.2.4.5. Рад у часопису националног значаја, категорија M52

22. Kitanović M., **Mrda P.**, Popović S., Miljić N.: *Fuel Economy Comparative Analysis of Conventional and Ultracapacitors-Based, Parallel Hybrid Electric Powertrains for a Transit Bus*, Mobility & Veh Mechanics, Fakultet inženjerskih nauka, 40, 3, pp. 71 - 84, 1450-5304, 629.341, 2014.
23. **Mrda P.**, Petrović V., Đinić S., Kitanović M.: *Development Of Continuously Variable Intake Manifold For Formula Student Racing Engine*, Mobility & Vehicle Mechanics, Fakultet inženjerskih nauka, 41, 3, pp. 21 - 38, 1450-5304, 62.843.4:[519.673], 2015.

1.2.4.6. Саопштење са скупа националног значаја штампано у изводу, категорија M64

24. **Mrda P.**, Petrović V., Đinić S.: *Razvoj usisnog kolektora varijabilne geometrije i telemetrijske jedinice za vozilo Formule student uz korišćenje NI-cRIO i NI-PXI hardvera i LabVIEW i DIAdem softvera*, NIDays 2014 - Beograd, Srbija, 20. Nov, 2014.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Током докторских студија Предраг Мрђа, 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

Савремени мотори са унутрашњим сагоревањем су изузетно комплексне машине. Са повећањем обима и броја захтева које модерни мотори СУС морају да задовоље, драстично се повећава потреба за развојним ресурсима и то посебно у погледу неопходног времена за стварање крајњег - оптимизованог производа. Захтеване перформансе мотора СУС, у смислу развијене снаге, економичности, токсичности и састава издувних гасова, условљавају примену бројних додатних и све комплекснијих система што додатно оптерећује развојне ресурсе. Са повећањем броја оваквих система и са њиховим додатним усавршавањем и усложњавањем, укупан број управљачких параметара расте готово експоненцијално, што за последицу има огроман раст броја потенцијалних радних режима мотора СУС које је потребно оптимизовати.

Оптимизација управљања, односно проналажење комбинације управљачких параметара који ће да резултују најприхватљивијим перформансама мотора, резултат је анализе, компромиса и манипулације подацима који се, уобичајено, добијају квазистационарним испитивањем мотора. Са друге стране, квазистационарно испитивање енормно великог броја радних режима мотора захтева превише времена које је, са аспекта притиска савремених тржишних захтева и временских ограничења за финализацију производа, једноставно неприхватљиво. Због ове чињенице улажу се велики научно-истраживачки напори на пољу испитивања мотора како би се пронашао начин да се неопходно време испитивања мотора што више скрати, уз задржавање или чак побољшање квалитета коначних резултата мерења.

Резултати испитивања мотора на стационарном режиму су несумњиво најтачнији, али при развоју прототипског мотора или неког његовог подсистема, ниво предзнања о објекту је недовољан и у том смислу је практично немогуће дефинисати одговарајући, довољно мали, број радних тачака чијим ће се испитивањем добити најрелевантнији подаци за даљу оптимизацију управљања. Ово, као и бројна друга ограничења, отворила су простор за истраживање другачијих приступа испитивању мотора и то пре свега моделски заснованом приступу и методама динамичког испитивања.

Предмет ове дисертације је истраживање у области динамичког испитивања мотора променом управљачког параметра применом рампе малог нагиба (*SDS – Slow Dynamic Slope*) уз примену одговарајућих математичких модела, а на основу експерименталног испитивања у стационарним и динамичким условима рада мотора СУС.

Научни циљеви дисертације су следећи:

- Развој метода и софтверске апликације за контролу система пробног стола при реализацији задате секвенце динамичког испитивања мотора СУС у реалном времену.
- Развој метода и програма за анализу динамичког одзива свих мерених ефективних и индикаторских параметара мотора СУС.

- Развој метода и програма за анализу снимљених резултата динамичког испитивања уз формирање апроксимације средње вредности одзива мерене величине у домену узлазне и силазне рампе управљачког параметра.
- Развој метода и програма за формирање математичког модела мотора СУС на основу снимљених динамичких резултата мерења применом различитих математичких модела заснованих на локалним линеарним моделима и функцијама радијалне основе.
- Развој математичких метода за интерпретацију добијених апроксимација и одређивање области радног подручја мотора унутар којих би било пожељно извршити додатна стационарна испитивања како би коначан модел боље репрезентовао физички процес реалног мотора. Уколико се методама динамичког испитивања обезбеди довољан ниво предзнања о испитиваном објекту, план стационарног испитивања може да се редукује уз задржавање, или чак побољшање крајњих резултата, чиме се значајно скраћује време потребно за испитивање мотора.
- Након одређивања позиција радних режима унутар глобалног радног простора мотора, предзнање о испитиваном објекту, добијено брзим динамичким испитивањем, може да се искористи како би се оптимизовао редослед спровођења стационарних радних режима. Променом одговарајућег генетског алгорита за решавање проблема комбинаторне оптимизације, добија се редослед извршавања радних режима који захтевају најкраће време стабилизације, односно најкраће време испитивања.

2.1. Релевантни библиографски извори

Бројни радови на тему испитивања мотора као сложеносг нелинеарног и динамичког система потврђују реалну потребу индустрије за даљим истраживањима у овој области [1-3]. Динамичка испитивања мотора, заснована на методи промене управљачког параметра по нагибној функцији (рампи) су релативно стара [4], а са развојем система управљања пробним столом за моторе, њихов потенцијал је све већи. У раду [5] су приказани резултати динамичког испитивања мотора применом *SDS* методе над управљачким параметром који је у директној вези са оптерећењем мотора. Оптерећење је варирано континуално у области позитивног обртног момента уз кртакторајна задржавања на минималној и максималној апсолутној вредности управљачког параметра. У овом раду су приказани резултати само два, релативно брза циклуса, симетричне промене управљачког параметра, а аутор је највећу пажњу посветио анализи одзива система за мерење садржаја *NOx* у издувном гасу. Овакав концепт динамичког испитивања мотора СУС ће бити коришћен као снова за даље истраживање у оквирима предметне дисертације.

Поред праћења промене ефективних параметара рада мотора на глобалном домену управљачких величина, у раду [6] је примењена *SDS* метода за потребе оптимизације угла претпаљења и система развода мотора СУС, односно величина која су функција глобалних управљачких величина. Како би овакво истраживање могло да се спроведе, пробни сто истраживачког центра AVL је био опремљен системима за контролисано динамичко управљање параметрима на нивоу управљачке јединице мотора, што представља значајан изазов.

Посебно позитивни резултати на пољу примене *SDS* методологије елаборирани су у раду [7], који је настао кроз сарадњу аутомобилске индустрије - компанија *BMW* и *AVL*. У овом раду посебна пажња је посвећена калибрацији управљачких параметара у близини границе сигурних, односно по испитивани мотор и мерну опрему, безбедних комбинација управљачких параметра. Компанија *MAZDA*, као једна од водећих компанија по иновативности у области светске ауто-индустрије је, такође у сарадњи са компанијом AVL, вршила истраживања на овом пољу [8].

Оптимизација управљања дизел-мотора на транзијентним режимима анализирана је применом сличне методе и приказана је у дисертацији [9]. У оквиру овог истраживања, аутор се посветио анализи веома брзих промена убризгане количине горива, дефинисаних нагибним функцијама у временском домену, али у циљу проучавања одзива система у смислу оствареног ефективног обртног момента и евентуалних корекција у смислу одржавања жељеног састава смеше.

Инжењери компаније *HONDA*, су кроз истраживање [10] објавили резултате стационарне апроксимације емисије честица бензинског мотора са директним убризгавањем уз примену *SDS* методологије при динамичком управљању параметра који дефинише почетак убризгавања у угаоном домену. Такође, у овом истраживању је примањена *SDS* метода са променљивим градијентима у оквиру једне динамичке секвенце, како би се применила спорија промена управљања унутар области у којима се очекује већа емисија честица.

Потенцијал наведене методологије није истражен до краја и стога се и даље ради на њеном усавршавању, а међу најновија истраживања спадају она обављена кроз сарадњу Катедре за моторе Машинског факултета у Београду и компаније *AVL* из 2015. године [11].

Анализом расположиве литературе и објављених резултата истраживања, јасно се могу издвојити предности и недостаци које поседује *SDS* метода као и претпоставке уз које може да се примени током испитивања мотора. Општа идеја примене динамичког испитивања мотора са релативно спором променом управљачког параметра, је да резултати таквог испитивања у потпуности замене резултате стационарног испитивања на домену промене датог управљачког параметра. Нажалост, поједини процеси који су последица одвијања радног циклуса мотора СУС имају изразиту временску константу, односно релативно споро реагују на промену улазне величине и могу да се испитују на овај начин само уз ограничавање нивоа тачности због знатног одступања од резултата стационарних испитивања. Са друге стране, може се показати да је поменутом методом, уз примену адекватних мерних техника, могуће формирати веома прецизне стационарне апроксимације, уколико промену посматраног моторског параметра карактерише релативно брз динамички одзив.

Кључни циљ ове дисертације је да се кроз теоријско и експериментално истраживање провери идеја примењивости динамичког испитивања мотора, ограниченог обима, као методе и предкорака за убрзано дефинисање оптималног плана стационарног испитивања мотора о коме не постоји довољан ниво предзнања. Анализом резултата динамичког теста могуће је издвојити информације о начелном понашању одређеног процеса у мотору, а оне се могу употребити за изградњу моделски засноване дефиниције ограничених области управљачког параметра. Над дефинисаним областима се потом спроводи стационарно испитивање скраћеног обима са коначном идејом да се ти резултати искористе за изградњу моделски засноване стационарне мапе мотора која би по тачности била упоредива са мапом радног поља мотора генерисаном кроз значајно обимнија стационарна испитивања. Поред наведеног, знање о испитиваном објекту, може веома ефикасно да се искористи у циљу оптимизације редоследа извршавања радних режима током испитивања.

- [1] Isermann R.: *Engine Modeling and Control*, Springer, Berlin, Germany, 2014.
- [2] Berger B.: *Modeling and Optimization for Stationary Base Engine Calibration*, Ph.D. Thesis, Technische Universität München, Germany, 2012.
- [3] Tietze N.: *Model-based Calibration of Engine Control Units Using Gaussian Process Regression*, Ph.D. Thesis, Technische Universität Darmstadt, Germany, 2015.
- [4] Godburn J., Brown D., Case R.: *Computer-controlled non-steady-state engine testing*, International Journal of Vehicle Design, vol. 12, no. 1, 1991, pp. 50–60.

- [5] Ward M. C., Brace C. J., Vaughan N. D., Ceen R., Hale T., Kennedy G.: *Investigation of 'Sweep' Mapping Approach on Engine Testbed*, SAE 2002 World Congress & Exhibition, 2002.
- [6] Keuth N., Thomas M., Pflügl H., Martini E., Bergold S.: *Utilization of the Slow Dynamic Slope Methodology for the Calibration of the ECU-Functions "Air Charge Determination" and "Torque Prediction" in the Series Production*, Proceedings of the Design of Experiments (DoE) in Engine Development: modern development methods to meet new challenges, vol. 1, 2009, pp. 122-136.
- [7] Leithgöb R., Bollig M., Büchel M., Henzinger F.: *Methodology for efficient calibration of model based ECU structures*, Proceedings of the 1. Internationales Symposium für Entwicklungsmethodik, Wiesbaden, Germany, 2005, pp. 195-210.
- [8] Murakami Y., Kusuki H., Nakagawa T., Yamamoto H., Leithgob R., Rainer A., Martini E.: *Slow Dynamic Slopes (SDS) Methodology Applied for a Stratified Gasoline Engine*, Proceedings of the Design of Experiments in Engine Development III, Renningen, Germany, 2007, pp. 413-423.
- [9] Giorgio M.: *Automotive Diesel Engine Transient Operation: Modeling, Optimization and Control*, Ph.D. Thesis, Università di Bologna, Italy, 2014.
- [10] Shimojo K., Kitamura Y., Sato M., Adachi S.: *Soot Modeling Using Quasi-Stationary Measurement for Gasoline Engine*, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, vol. 47, no. 3, 2016, pp. 665-671.
- [11] Miljić N., Popović S., Kitanović M., Mrđa P., Đinić S., Petrović V.: *Benchmarking of an existing engine in an automated way*, Report no. ICED 1510/C01 SDS, AVL, Graz, Austria, 2015.

3. Полазне хипотезе

- Радни режим мотора СУС условљен је стањем одређеног броја управљачких величина, а мерене ефективне и индикаторске величине за дати радни режим постају репрезентативне тек након истека времена стабилизације радног режима. При испитивању мотора СУС у смислу стабилизације радног режима, прате се величине које имају највећу термичку инерцију, а то су углавном температуре издувних гасова мерене у одређеним пресецима издувног система.
- Због изузетно великог броја управљачких параметара и њиховог сталног пораста при даљем развоју управљачких јединица мотора СУС, практично је немогуће спровести стационарна испитивања на свим режимима окарактерисаним независним варирањем појединачних управљачких параметара.
- Одређене комбинације управљачких параметара не могу да се реализују на предметном мотору јер могу да доведу до оштећења мотора или опреме за мерење појединих физичких величина на пробном столу за моторе. У том смислу, неопходно је одредити границе појединих управљачких параметара у n -димензионом простору, где n представља број независних управљачких параметара.
- Стационарна карактеристика, односно вредности стационарних одзива линеарног система првог реда, може да се одреди спровођењем динамичког теста применом методе промене управљачког параметра по рампи ниског градијента и додатне секвенце промене управљачког параметра са симетричним (негативним) градијентом. Уколико је рампа довољно спора, у средишњем делу опсега управљачког параметра, дати систем ће имати

константан отклон кога је могуће компензовати резултатима теста са побудом симетричног градијента.

- Мотор СУС је изразито нелинеаран динамички систем са низом појава које имају стохастички карактер. Упркос томе, ако се претходна хипотеза примени над оваквим објектом, и уколико примењена рампа има довољно низак градијент, тј. ако је временска константа посматраног процеса на мотору довољно кратка, нелинеарност стационарне карактеристике посматране величине може да се идентификује применом *SDS* методологије.
- Информација о облику нелинеарности мерене физичке величине је од изузетне важности и квантификавањем области промене градијента стационарног одзива могуће је дефинисати положај радних режима чијим би се испитивањем побољшао квалитет стационарне апроксимације. За квантификавање величине нелинеарности, у општем смислу, могу да се користе локални линеарни *neuro-fuzzy* модели (попут *LOLIMOT* модела) јер положаји центара локалних модела и њихове границе по својој природи указују на присуство промене градијента величине коју модел описује.

4. Научне методе истраживања

За остваривање научних циљева дисертације користе се следеће методе:

- Експерименталне методе - Испитивање мотора у стационарним условима на читавом радном пољу мотора у домену: угаона брзина коленастог вратила - оптерећење мотора. Током испитивања мере се сви ефективни параметри (угаона брзина, ефективни обртни момент, ефективна специфична и часовна потрошња горива, притисци и температуре радне материје на уписној и издувној страни мотора и др.) и индикаторски параметри (ток притиска у свим цилиндрима вишецилиндарског мотора у угаоном домену).
- Експерименталне методе динамичког испитивања мотора применом промене управљачког параметра по рампи ниског градијента. Динамичко испитивање које садржи елементе стационарног радног режима и чисто динамичко испитивање применом *SDS* методологије ће бити предмет анализе и истраживања.
- Методе хармонијске, статистичке и динамичке анализе измерених сигнала.
- Методе математичког моделирања нелинеарних система применом различитих апроксимативних модела, попут функција радијалне основе и *LOLIMOT* модела.
- Методе решавања проблема комбинаторне оптимизације применом генетских алгоритама.

5. Очекивани научни допринос

Анализом трендова данашње ауто-индустрије и планираних концепата погонских система, неоспорно је да нас очекују све комплекснији погонски системи и да калибрација и оптимизација управљања овим системима постаје све већи изазов који захтева значајне финансијске и временске ресурсе. Протеклих деценија улагани су велики научно-истраживачки напори за проналажење метода које могу да доведу до скраћења времена неопходног за испитивање мотора на пробном столу, како због смањења трошкова, тако и због, генерално, бржег добијања резултата мерења. У том смислу, динамичка испитивања поседују велики потенцијал. Са друге стране, методе динамичког испитивања постају све актуелније због све већих потреба да се на пробним столовима за моторе симулирају реални услови експлоатације који су, барем код аутомобилских мотора, готово искључиво динамички. Такође, веома је значајно што методологија, која ће бити коришћена приликом израде ове

дисертације, може потенцијално да се искористи при испитивању других нелинеарних и динамичких система, независно од области погонских система и мотора СУС.

Оригинални приступ проблематици испитивања мотора у динамичким условима и развој нових методологија за убрзано испитивање мотора уз задржавање квалитета добијених података су кључни елементи научног доприноса предложене дисертације. С обзиром на то да су процеси који се одвијају у мотору СУС нелинеарног и динамичког карактера, није свеједно како је дефинисан радни режим са кога започиње динамички тест. У том смислу, биће реализовано димичко испитивање *SDS* методологијом која систем уводи у поновљиве осцилације. Оваквим приступом, стационарна апроксимација мерене излазне величине ће поседовати блаже промене у односу на резултате *SDS* испитивања која започињу са стационарног радног режима. Управо ова чињеница, допринеће бољој идентификацији области глобалног радног простора унутар којих је пожељно спровести додатна стационарна испитивања, како би коначна апроксимација прецизније описивала стационарну карактеристику мереног одзива система.

Предвиђени резултати истраживања заснивају се на прикупљању и обради велике количине експерименталних података најсавременијим мерним методама, на реалном мотору у лабораторијским условима, што овој дисертацији даје посебан значај.

6. План истраживања и структура рада

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 испитивања мотора са посебним освртом на тематику динамичког испитивања мотора.
- Анализа система за динамичка испитивања мотора и интеграција софтверских решења за контролу динамичког теста у лабораторијским условима.
- Адаптација контролног модула динамичке моторске кочнице пробног стола за испитивање на Катедри за моторе Машинског факултета Универзитета у Београду и његовог спрезања са расположивим индустријским решењима у области система за испитивање мотора.
- Експериментално испитивање мотора у стационарним условима рада. Аквизиција свих релевантних ефективних и индикаторских параметара типичног аутомобилског мотора. Ово испитивање се врши у циљу прикупљања података који ће служити као референтни сет података за евалуацију наредних фаза испитивања.
- Експериментално испитивање у динамичким условима применом методе споре промене управљачког параметра по нагибној функцији ниског градијента. Основни концепт динамичког теста је следећи:
 - Број обртаја мотора се одржава константним посредством контролера динамичке моторске кочнице.
 - Оптерећење мотора се континуално мења по секвенцама динамичких тестова. За време динамичког теста се врше мерења у временском домену (за ефективне параметре) и у угаоном домену (за индикаторске параметре).
- Развој метода и софтверске апликације за временско синхронизовање и филтрирање динамички снимљених података. Одређивање апроксимативне средње вредности резултата динамичког теста на домену промене управљачког параметра.

- Развој метода и софтверске апликације за формирање различитих категорија апроксимативних модела на основу динамичких резултата мерења. Анализа положаја центара и граница локалних линеарних модела и анализа градијената глобалне апроксимације како би се идентификовале области радног поља мотора у којима је пожељно спровести стационарна мерења ограниченог обима у циљу формирања апроксимативног модела који боље описује физички процес.
- Верификација методологије на основу претходно снимљених стационарних испитивања глобалног апроксимативног, стационарног модела формираног над основним сетом управљачких параметара мотора СУС, тј. бројем обртаја и оптерећењем мотора.
- Након одређивања тачака плана стационарног испитивања, програмском реализацијом адекватног алгоритма за решавање проблема комбинаторне оптимизације, одређује се оптималан редослед извршавања стационарних радних режима.

7. Закључак и предлог

На основу изложене анализе пријаве теме кандидата Предрага Мрђе, магистарског 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 пододбна 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 Предрагу Мрђи, магистру машинског студенту Докторских студија Машинског факултета Универзитета у Београду, одобри израда докторске дисертације под називом:

„Повећање ефикасности испитивања мотора СУС применом динамичких метода“

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 Ненад Миљкић, ванредни професор на Катедри за Моторе Машинског факултета Универзитета у Београду.

Београд, 11.02.2020. год.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

др Ненад Миљкић, ванредни професор, ментор
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Слободан Поповић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

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

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ

Име и презиме: др Ненад Миљић

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., Miljić N., Popović S., Kitanović M.: Continuous Slow Dynamic Slope Approach for Stationary Base Internal Combustion Engine Mapping, Thermal Science, online first only, doi: 10.2298/TSCI190308171M, ISSN: 0354-9836, 2019. (IF=1.541 за 2018.)
2. Kitanović M., Popović S., Miljić N., Mrđa P.: Numerical Analyses of a Hydraulic Hybrid Powertrain System for a Transit Bus, Thermal Science, online first only, doi: 10.2298/TSCI190308172K, ISSN: 0354-9836, 2019. (IF=1.541 за 2018.)
3. Mrđa P., Miljić N., Popović S., Kitanović M.: 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: 12151225, doi: 10.2298/TSCI170915224M, ISSN: 0354-9836, 2018. (IF=1.541 за 2018.)
4. Miljić N., Popović S., Mrđa P., Kitanović M.: Slow Dynamic Slope method in IC engine benchmarking, Thermal Science, Volume 22, Issue 3, Pages: 12711283, doi: 10.2298/TSCI170921226M, ISSN: 0354-9836, 2018. (IF=1.541 за 2018.)
5. Miljić N., Tomić M.: A Neuro-Fuzzy Based Combustion Sensor for the Control of Optimal Engine Combustion Efficiency, Thermal Science, Volume 17, Issue 1, Pages: 135-151, doi: 10.2298/TSCI120703160M, ISSN: 0354-9836, 2013. (IF=0.962 за 2013.)

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА
