

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Веће научних области техничких наука
(Назив стручног већа коме се захтев упућује, сагласно

члану 6. и чл. 7 став 1. овог правилника)

665/4

(Број захтева)

09.07.2020. године

(Датум)

ЗАХТЕВ**за давање сагласности на реферат о урађеној докторској дисертацији**

Молимо да, сходно члану 46. ст. 5 тач. 4. Статута Универзитета у Београду („Гласник Универзитета“, број 131/06)“, дате сагласност на реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата:

ПРЕДРАГ (ДРАГОСЛАВ) МРЂА

(име, име једног од родитеља и презиме)

КАНДИДАТ **ПРЕДРАГ (ДРАГОСЛАВ) МРЂА** уписан на Докторске студије 2010. год.

(име, име једног од родитеља и презиме)

Подноео је захтев за израду докторске дисертације:

ПОВЕЋАЊЕ ЕФИКАСНОСТИ ИСПИТИВАЊА МОТОРА СУС ПРИМЕНОМ ДИНАМИЧКИХ МЕТОДА

Универзитет је дана 30.04.2020. год. својим актом под бр. 61206-833/2-20 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

ПОВЕЋАЊЕ ЕФИКАСНОСТИ ИСПИТИВАЊА МОТОРА СУС ПРИМЕНОМ ДИНАМИЧКИХ МЕТОДА

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата: **ПРЕДРАГ (ДРАГОСЛАВ) МРЂА**
(име, име једног од родитеља и презиме)

Образована је на седници одржаној 04.06.2020. године, одлуком факултета под бр. 665/2, у саставу:

Име и презиме члана комисије	звање	научна област	установа у којој је запослен
1. <u>Др Ненад Миљкић</u>	Ванр. проф.	Мотори	Машински факултет Београд
2. <u>Др Слободан Поповић</u>	Ванр. проф.	Мотори	Машински факултет Београд
3. <u>Др Драган Кнежевић</u>	Доцент	Мотори	Машински факултет Београд
4. <u>Др Јован Дорић</u>	Ванр. проф.	Мотори СУС и моторна возила	ФТН Нови Сад
5. <u>Др Радивоје Пешић</u>	Ред. проф.	Мотори СУС и моторна возила	Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Наставно-научно веће факултета прихватило је извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана 09.07.2020. године.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Радивоје Митровић

Прилог: 1. Извештај комисије са предлогом.

2. Акт Наставно-научног већа факултета о усвајању извештаја.

3. Примедбе дате у току стављања извештаја на увид јавности, уколико је таквих примедби било.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број: 665/4
Датум: 09.07.2020. године
Београд, Краљице Марије 16

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 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета и реферата Комисије у саставу: др Ненад Миљић, ванр. проф., ментор, др Слободан Поповић, ванр. проф., др Драган Кнежевић, доц., др Јован Дорић, ванр. проф., ФТН Нови Сад и др Радивоје Пешић, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу о оцени докторске дисертације „Повећање ефикасности испитивања мотора СУС применом динамичких метода“ студента докторских студија **Предрага Мрђе, маг. инж. маш.**, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници одржаној 09.07.2020. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Усваја се реферат Комисије о урађеној докторској дисертацији **„ПОВЕЋАЊЕ ЕФИКАСНОСТИ ИСПИТИВАЊА МОТОРА СУС ПРИМЕНОМ ДИНАМИЧКИХ МЕТОДА“** студента **ПРЕДРАГА МРЂЕ, маг. инж. маш.**

Докторску дисертацију и реферат Комисије о урађеној докторској дисертацији доставити на давање сагласности Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, по истеку рока од 30 дана у коме су били на увиду јавности.

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

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Радивоје Митровић

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Машински факултет

ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Предрага Мрђе**

Одлуком бр. 665/2 од 04.06.2020. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Предрага Мрђе, маг. инж. маш. студента Докторских студија на Машинском факултету Универзитета у Београду, под насловом

„Повећање ефикасности испитивања мотора СУС применом динамичких метода“

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат Предраг Мрђа, маг. инж. маш, уписао је Докторске академске студије Машинског факултета Универзитета у Београду школске 2010/2011. године. Положио је испите из свих предмета предвиђених наставним планом и програмом за ниво Докторских академских студија са просечном оценом 10,00 (десет).

На основу Молбе број 9/13271 од 19.09.2013. године, дата му је сагласност за мировање током школске године 2012/2013 јер није испунио услов за упис треће године студија предвиђен Правилником о докторским студијама. Кандидату је одобрено продужење студијског програма у школској 2016/2017 години према решењу 2382/1 од 05.10.2016. и у школској 2017/2018 према решењу 2352/1 од 06.10.2017. због непуњавања услова неопходних за пријаву теме које прописује Правилник о докторским студијама на Машинском факултету.

Кандидат Предраг Мрђа, маг. инж. маш., пријавио је тему докторске дисертације под називом **„Повећање ефикасности испитивања мотора СУС применом динамичких метода“** 10.06.2019. године (арх. бр 1078/1) и за ментора је предложио проф. др Ненада Миљиха. На основу пријаве кандидата, Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду је прихватило предлог дисертације, а на основу предлога Катедре за моторе (арх. бр. 1078/3), именovalo Комисију за подношење извештаја о прихватању теме докторске дисертације и њене научне заснованости у саставу: др Ненад Миљих, ванредни професор,

др Слободан Поповић, ванредни професор и др Јован Дорић, ванредни професор Факултета техничких наука Универзитета у Новом Саду.

На основу извештаја Комисије (арх. бр. 254/1) од 11.02.2020.г., Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду 13.02.2020.г. доноси одлуку (арх. бр.254/2), којом прихвата предлог о испуњености услова о научној заснованости теме докторске дисертације. Машински факултет подноси захтев Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, које је на седници одржаној 30.04.2020.г. донело одлуку да се даје сагласност на предлог теме докторске дисертације Предрага Мрђе, маг. инж. маш, (одлука бр. 61206-833/2-20), а на основу чега је 04.06.2020. г. одлуком број 665/2, именована Комисија за оцену и одбрану предметне докторске дисертације под менторством проф. др Ненада Миљића.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација **„Повећање ефикасности испитивања мотора СУС применом динамичких метода”** припада области техничких наука (машинство) и ужој научној области Мотори са унутрашњим сагоревањем.

1.3. Биографски подаци о кандидату

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. Основне академске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду уписује 2005. године. Основне академске студије завршио је 18.09.2008., са просечном оценом 8,44 одбранивши 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 просечном оценом 9,70 одбранивши 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. Од 01.01.2011. 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 руководиоца проф. др Мирољуб Томић. Од 11.07.2013. до 29.08.2019 је био запослен на Машинском факултету у Београду као асистент на катедри за Моторе. Данас је запослен као самостални стручнотехнички сарадник на Машинском факултету.

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.

Школске 2011/2012. године на Машинском факултету Универзитета у Београду кандидат је, у статусу студента Докторских студија, 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, 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 - MOT, Стручна пракса Б - MOT и Пројекат мотора.

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

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација, кандидата Предрага Мрђе, маг. инж. маш, под називом „**Повећање ефикасности испитивања мотора СУС применом динамичких метода**“ изложена је на укупно 223 стране и садржи 91 нумеричких израза, 112 слика и дијаграмских приказа, 27 табела и 188 коришћених референтних литературних извора. Докторску дисертацију чине следећих десет поглавља и списак литературе:

1. Увод
2. Калибрација управљачких параметара мотора СУС
3. Математички модели у процесу калибрације
4. План испитивања мотора СУС
5. Системи пробног стола за стационарно и динамичко испитивање мотора
6. Динамичко испитивање мотора методом СДН
7. Резултати динамичког испитивања мотора методом СДН
8. Повећање ефикасности стационарног испитивања мотора СУС
9. Редослед спровођења стационарних радних режима током испитивања
10. Закључак и смернице за будући рад

На крају рада је дат Додатак са описом коришћене мерне опреме, списак коришћених ознака, библиографија и биографија кандидата.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У *првом поглављу*, које уједно представља и уводно поглавље докторске дисертације, дат је осврт на еколошки утицај, будући развој мотора СУС и објашњена је комплексност управљања мотором СУС, одакле је проистекла идеја за предмет и циљ ове докторске дисертације. У њему је, такође, дат преглед релевантне литературе из предметне области.

Друго поглавље садржи општи приказ концепта калибрације параметара софтвера електронске управљачке јединице мотора СУС. Дат је осврт на методе варирања једног параметра правовремено и на методе моделски засноване калибрације. Такође, описани су кораци који се спроводе при посредној и директној калибрацији управљачких параметара мотора СУС.

Основне карактеристике апроксимативних математичких модела који се користе при моделски заснованој калибрацији управљачких параметра мотора СУС приказане су у оквиру *трећег поглавља*. Полиномски, сплајн и апроксимативни сплајн модели су анализирани са аспекта њиховог постављања и начина за одређивање тражених коефицијената модела. Овакви модели, као скуп подмодела одређене нелинеарности, послужили су као основа за формирање модела облика вештачке неуронске мреже (ВНМ). На примеру вишеслојне ВНМ указано је на нелинеарност која је последица узајамног деловања тежинских коефицијената, а у наставку су, у основним цртама, описане функције радијалне основе (ФРО) и функције Гаусовог процеса (ГП) које су примењиване приликом одређивања конкретних апроксимација на основу резултата испитивања.

Примена одређене категорије математичких модела у директној је вези са планом испитивања мотора СУС и обрнуто. С тим у вези, у оквиру *четвртог поглавља*, објашњени су концепти формирања плана испитивања мотора, почевши од стационарног плана испитивања који подразумева примену централног композитног дизајна, категорију оптималног дизајна, примену латинских квадрата све до квази-насумичних метода узорковања према Халтоновој и Соболовој секвенци. Такође приказани су примери одзива једноставног динамичког нелинеарног модела на динамичке секвенце формиране према плану динамичког испитивања. За ову категорију побуда изабране су: насумичне динамичке секвенце, нагибне функције, нагибне функције са задржавањем, вишеструке хармонијске функције и хармонијске функције променљиве фреквенце.

Пето поглавље садржи опис коришћене лабораторијске инсталације за стационарно и динамичко испитивање мотора СУС. Посебна пажња је посвећена концепту управљања испитним столом током динамичких испитивања. Описана је основна архитектура развијене NI LabVIEW апликације као посредника при размени информација између контролера моторске кочнице, контролера оптерећења мотора и софтвера AVL CAMEO намењеног аутоматизацији пробног стола за моторе.

У оквиру *шестог поглавља* дате су теоријске основе динамичког експеримента са променом управљачког параметра по нагибној функцији. Приказан је начин одређивања основне стационарне апроксимације на примеру линеарног система првог реда. Размотрени су различити методи припреме система пре спровођења ефективног дела динамичког теста, чиме је направљена разлика између стационарне и динамичке припреме система. На основу ових идеја обављено је динамичко испитивање мотора са спором динамичком нагибном променом управљачког параметра (СДН) на различитим брзинским режимима и за различите нагибе, тј. трајања сигнала побуде. Такође, анализирани су резултати динамичког теста, за различите мерне позиције и конфигурације експеримента.

Стационарне апроксимације, тј. кориговане средње линије овојнице испитивања са СДН, у домену глобалних управљачких величина (броја обртаја и оптерећења мотора), приказане су у *седмом поглављу*. Такође, приказане су релативне разлике резултата експеримента са СДН

у односу на резултате стационарног испитивања мотора. Мерене величине карактерише различита динамика процеса и мерног ланца, а с тим у вези је дат коментар у смислу апсолутне тачности мерења.

У *осмом поглављу* приказан је начин на који могу да се искористе резултати испитивања са СДН како би се подигао ниво предзнања о испитиваном објекту, а у циљу повећања ефикасности стационарног плана испитивања. Анализа градијената стационарне апроксимације указује на области радног поља мотора унутар којег би додатне тачке испитивања значајно смањиле грешку апроксимација формираних над редукованим бројем тачака испитивања. За реализацију овог дела рада, извршена је статистичка анализа резултата математичких апроксимативних модела на тачкама плана испитивања унутар граница формираних модела. Идентификација карактеристичних области је приказана за резултате стационарних и испитивања са СДН различитог трајања и различитог начина припреме система. Тиме је потенцијал методе СДН, у овом смислу, интерпретиран и приказан за неколико карактеристичних мерених величина.

Установљено је да интерпретација резултата испитивања са СДН, у смислу побољшања стационарног плана испитивања, има смисла за мерене величине релативно брзог одзива. Стационарне апроксимације мерења са СДН температуре издувних гасова показују значајна одступања од стационарних резултата, али у оквиру *поглавља девет* је показано да управо ови резултати могу највише да допринесу убрзању процеса испитивања мотора, односно уштеди времена и повећању ефикасности. Поставком математичког проблема „отворене путање трговачког путника”, за критеријумску функцију добијену на основу приближних вредности разлике температура издувних гасова на тачкама плана испитивања, формира се редослед извршавања стационарних радних режима са значајно скраћеним просечним временом стабилизације. За решавање овог проблема примењен је одговарајући генетски алгоритам.

У последњем поглављу су дати општи закључци овог истраживања и смернице за будући рад на тему динамичког испитивања мотора СУС.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација под називом „**Повећање ефикасности испитивања мотора СУС применом динамичких метода**“ кандидата Предрага Мрђе представља савремен и оригиналан допринос у области испитивања мотора СУС. Ова дисертација је урађена на основу истраживачких пројеката Машинског факултета у Београду и водеће компаније у области развоја погонских система, аустријским AVL, са тематиком која је данас актуелна у свету.

Имајући у виду вишедимензионални карактер управљања модерним погонским системима, за успешно реализован процес калибрације, захтева се испитивање великог броја радних режима. План стационарног испитивања је у директној вези са квалитетом крајњих апроксимативних модела на основу којих се приступа процесу моделски засноване калибрације управљачких параметара. Како би план испитивања био исправно формиран, потребна је што већа количина предзнања о испитиваном објекту, а метода релативно брзог прикупљања података динамичким испитивањем може да допринесе у том смислу. Промена једног управљачког параметра по нагибној функцији позитивног и симетричног, тј. негативног, градијента (СДН) примењена је у предметној дисертацији. На основу

стационарне апроксимације СДН одзива, дата је препорука за позиционирање радних режима унутар глобалног радног поља мотора СУС, а чијом би се реализацијом добили апроксимативни модели који тачније описују реалну физичку промену посматраног параметра.

С обзиром на то да је мотор СУС изразито нелинеаран динамички систем, извршено је поређење резултата примене наведене методологије за различите секвенце динамичког теста, тј. секвенце које почињу стационарним радним режимом и секвенце конфигурисане као искључиво динамичке промене управљања.

Успешна реализација, као и испуњење постављених циљева предметног истраживања, које је кроз рад на дисертацији кандидат остварио, одликују се следећим:

- 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 је пожељно извршити испитивање, тј. прикупљање података, како би коначан модел боље репрезентовао физички процес реалног мотора.
- Након одређивања позиција стационарних радних режима унутар глобалног радног простора мотора, предзнање о испитиваном објекту стечено на основу СДН методе је употребљено за оптимизацију редоследа спровођења стационарних радних режима. Променом одговарајућег генетског алгоритма за решавање проблема комбинаторне оптимизације, добија се редослед извршавања радних режима који захтевају најкраће време стабилизације, односно најкраће време испитивања.

Оригиналан приступ, коришћен у истраживању, као и добијени резултати настали моделски заснованом комбинацијом метода стационарног и динамичког испитивања мотора, дају значајан допринос методологији испитивања мотора. Значај се посебно односи на аспект скраћења времена потребног за испитивање, што је један од највећих проблема са којима се суочавају савремени приступи у поступцима оптимизације и калибрације мотора.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Прегледом цитиране литературе, издвојене у поглављу Библиографија, закључује се да је кандидат Предраг Мрђа при изради дисертације користио литературу која је референтна и актуелна. У циљу систематизације резултата постојећих истраживања из области која је предмет дисертације, кандидат је навео значајне референце које за тему имају динамичко испитивање мотора СУС спором променом управљачког параметра (метода СДН).

У докторској дисертацији коришћена је обимна савремена и релевантна литература из области испитивања, управљања и дијагностике мотора СУС као и литература из области теорије и примене вештачких неуронских мрежа и теорије комбинаторне оптимизације. Већина коришћене литературе је новијег датума и објављена у референтним научно-стручним часописима високог ранга, што потврђује савременост у приступу анализи проблема разматраних у докторској дисертацији. Велики део наведене литературе је кандидату служио као основа за преглед стања области истраживања, а нарочито у области примене динамичких метода испитивања мотора. Критичка анализа постојећих метода динамичког испитивања омогућила је примену оригиналне методе и приступа приказаних у дисертацији. Истицањем најважнијих резултата, презентованих у коришћеној литератури, дат је релевантан приказ постојећег стања у областима, које су биле предмет истраживања кандидата током рада на дисертацији. Коришћене референце представљају избор савремене литературе, која приказује актуелно стање у предметној области истраживања у свету, али које указују и на могуће правце даљег научног рада.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

За реализацију постављеног циља истраживања, тј. креирања и верификације методологије, која може да допринесе повећању ефикасности процеса испитивања мотора применом динамичког испитивања, коришћено је више различитих научно-истраживачких метода. Применом метода аналитичког приступа обрађени су теоријски динамички одзиви поједностављених модела посматраних мерених величина. Тиме је створен увид у предности и недостатке динамичких секвенци које започињу стационарним радним режимом и дато је адекватно поређење са одзивима секвенци које имају искључиво динамички карактер. Како би строго контролисани временски домен динамичког испитивања мотора СУС могао да се реализује у лабораторијским условима, на програмској платформи LabVIEW, формирана је надоградива архитектура и одговарајућа апликација за размену команди између софтвера за аутоматизацију процеса испитивања погонских система AVL CAMEO и контролера динамичке кочнице на Катедри за моторе. Поред динамичког, извршено је и веома исцрпно стационарно испитивање предметног мотора како би стационарне апроксимације, добијене на основу резултата динамичког испитивања, могле да се пореде са стварним стационарним карактеристикама.

Узимајући у обзир различите категорије и нивое сложености модела који описују нелинеарности излазног параметра посматраног објекта на домену глобалних управљачких величина, извршена је анализа области радног поља, унутар којих је пожељно извршити испитивање како би стационарна апроксимација имала што мање одступање од резултата стварног стационарног испитивања. Квантификација вредности функције која описује у којој области треба повећати, односно смањити, заступљеност радног режима, добијена је на основу анализе позиција подмодела Lolimot модела, а тачност оваквог приступа је потврђена резултатима градијентне анализе посматране излазне величине.

Анализа заступљености радног режима унутар глобалног радног поља има значајан утицај на квалитет и перформансе апроксимативних модела заснованих на вештачким неуронским мрежама, што је потврђено формирањем апроксимације применом функција радијалне основе и моделима заснованим на Гаусовом процесу. С обзиром на то да позиције поменутих области, унутар којих би било пожељно имати повећан број испитивања на стационарном радном режиму, зависе од динамике посматраног процеса и динамике коришћеног мерног ланца, методологија испитивања мотора променом динамичког управљања путем споре динамичке промене управљачког параметра даје најбоље резултате за мерене параметре релативно брзог одзива, односно мање термичке инерције. Тиме формирање стационарне

апроксимације температуре издувних гасова има највећу апсолутну грешку, али управо ове информације могу да се искористе за највеће повећање ефикасности процеса испитивања мотора. Примене метода комбинаторне оптимизације се огледају кроз постављање адекватне формулације проблема „трговачког путника“ за решавање проблема оптималног редоследа извршавања стационарних радних режима, што са аспекта минимално потребног времена стабилизације радног режима поседује највећи потенцијал за уштеду времена на пробном столу за испитивање мотора СУС. За решавање овог проблема формиран је и оптимизован одговарајући генетски алгоритам.

3.4. Применљивост остварених резултата

Главни резултати ове дисертације су:

- Успостављање математичких апроксимативних модела на основу резултата динамичког испитивања са спором променом управљачког параметра по нагибној функцији;
- Одређивање области глобалног радног простора мотора СУС унутар којих би било пожељно повећати број испитивања на стационарним радним режимима како би коначни апроксимативни модел дао мања одступања од реалне промене посматране физичке величине;
- Анализа утицаја резултата испитивања са СДН на различите методе мерења физичких величина (температуре, притисци, протоци, индикаторске величине, специфичне величине итд.);
- Одређивање приближно оптималног редоследа испитивања стационарних радних режима решавањем недетерминистичких комбинаторних проблема, на основу критеријумске функције која је у директној вези са неопходним временом стабилизације радног режима.

Динамичким испитивањем се у релативно кратком временском оквиру прикупља значајна количина информација о испитиваном објекту. У конкретном случају, испитиван је мотор СУС, али идеја је примењива и приликом испитивања других сложених и нелинеарних система у домену машинског инжењерства. У називу методе која је окарактерисана спором динамичком променом управљачког параметра, реч „спора“ је потпуно релативна, а од тога колико ће трајати нагибина промена, односно ког ће бити градијента и опсега промена управљачког параметра, зависи од система који је подвргнут динамичком испитивању. У том смислу, резултати динамичког испитивања могу да се искористе за оптимизовање стационарног плана испитивања, што је показано у предметној дисертацији.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је током вишегодишњег научно-истраживачког рада, а посебно током израде ове докторске дисертације показао да је у стању да самостално решава проблеме и да успешно влада савременим научним сазнањима, као и теоријским и нарочито експерименталним методама, што представља основу за даљи успешан научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру рада на дисертацији „Повећање ефикасности испитивања мотора СУС применом динамичких метода“ кандидат Предраг Мрђа је потврдио и проширио постојећа знања у области динамичког испитивања мотора СУС са применом управљања по спорој нагибној функцији, па тиме и ова докторска дисертација представља научни допринос у области мотора СУС.

Научни доприноси предметне дисертације су:

- Нумеричко-експерименталне методе анализе стационарних апроксимација добијених на основу резултата динамичког испитивања која започињу стационарним радним режимом и резултата динамичког испитивања чије управљачке секвенце имају искључиво динамички карактер;

Стручни доприноси предметне дисертације су:

- Успостављање модела идентификације области радног поља мотора унутар којих би било пожељно извршити стационарна испитивања како би стационарни апроксимативни модел боље описивао посматрану промену мерене физичке величине;
- Развој и примена методе за дефинисање приближно најефикаснијег редоследа извршавања радних режима стационарног плана испитивања мотора СУС.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Динамичко испитивање мотора СУС, као примарних погонских система цивилног и комерцијалног транспорта, се у свету примењује деценијама уназад при калибрацији управљачких параметара. С обзиром на то да се мотори СУС, у већини случајева, користе у динамичким условима, истраживања у овој области су од великог значаја. Основна идеја методе засноване на СДН је да се, на доста бржи начин, у поређењу са искључиво стационарним испитивањем, дође до приближних вредности стационарних апроксимација посматраних мерених величина. Одступање овако добијених стационарних апроксимација од резултата стационарног испитивања је очекивано јер је мотор СУС изузетно нелинеаран динамички систем, са елементима стохастичких процеса. Из тог разлога, за разлику од динамичких, стационарна испитивања представљају најпоузданији извор информација о радном процесу на датом режиму.

С обзиром на све захтевнија ограничења која се пред моторе СУС постављају, посебно у смислу економичности и састава издувних гасова, даље усложњавање погонских система будућности је извесно. Комплексне погонске системе карактерише изузетно висок број комбинација управљачких параметара. Испитивање свих наведених комбинација на пробном столу у стационарним условима не би могло да се реализује у разумним временским, а тиме и економским оквирима. У том смислу, предложена анализа резултата СДН методе има повољан ефекат на редукцију броја радних режима на којима је потребно извршити испитивање мотора СУС, уз задржавање квалитета апроксимације. Такође, у оквиру дисертације је представљена метода оптимизације редоследа извршавања радних режима који чине стационарни план испитивања, а на основу резултата релативно брзих динамичких тестова које карактерише спора динамичка промена управљачког параметра.

Треба напоменути да испитивање засновано на методологији СДН има најбоље резултате уколико се посматра излазна величина коју карактерише релативно кратка временска константа, тј. брз динамички одзив. Испитивањем је установљено да у ову категорију спадају мерења притиска и протока у временском домену, као и индикаторски ток притиска у

цилиндру мотора. Такође, може се рећи да и одређена мерења температуре могу да дају прихватљиве резултате под условом да је амплитуда промене излазне температуре релативно уска. У супротности са наведеним, мерење температуре издувних гасова мотора СУС, на пресецима испред и иза турбине, у динамичким условима, дају резултате који у највећој мери одступају од стационарних резултата, али управо ови подаци омогућавају оптимизацију редоследа извршавања стационарног плана испитивања.

С обзиром на то да је у дисертацији разматрано динамичко испитивање код кога је вариран један управљачки параметар (параметар оптерећења мотора) по спорој нагибној функцији, будућа истраживања у овој области би могла да комбинују динамичко управљање два, или више, независна управљачка параметра. Тиме би се, у још већој мери, убрзало прикупљање информација о испитиваном мотору, а последично и повећала ефикасност процеса испитивања мотора СУС.

4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат Предраг Мрђа је, кроз усавршавање и рад на више научних и стручних пројеката, био аутор и коаутор 24 рада на домаћим и међународним скуповима и у часописима. Учествовао је у реализацији већег броја инсталација намењених унапређењу наставе и актуелним научним и комерцијалним истраживањима Катедре за моторе.

Научни допринос кандидата у смислу формирања стационарних апроксимација за СДН секвенце које садрже стационарни радни режим приказан је у поглављима 6 и 7 предметне дисертације и објављен је у раду „*Slow Dynamic Slope method in IC engine benchmarking*“ у часопису *Thermal Science* категорије M23 и доступан је на е-адреси: <http://www.doiserbia.nb.rs/Article.aspx?id=0354-98361700226M> [2]. У истим поглављима дата је паралелна анализа резултата истраживања са динамичким секвенцама које имају искључиво динамички карактер, а ти резултати су приказани у раду „*Continuous Slow Dynamic Slope Approach for Stationary Base Internal Combustion Engine Mapping*“, у часопису *Thermal Science* категорије M22 који је доступан на е-адреси: <http://www.doiserbia.nb.rs/Article.aspx?id=0354-98361900171M> [1].

Научни допринос докторске дисертације верификован је у следећим радовима објављеним у референтним међународним и домаћим научним часописима и на престижним конференцијама у земљи и иностранству:

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*, Volume 24, Issue 1, Pages: 147-158, doi: 10.2298/TSCI190308171M, ISSN: 2334-7163, 2019. (IF=1.541 за 2018.)

Научни радови у међународним часописима, категорије M23

2. 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.)
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.)

Рад [3] је цитиран у раду са DOI бројем: 10.18502/keg.v5i6.7091. Истраживање приказано у раду [3] представља стручни допринос који је у блиској вези са динамичким испитивањем заснованим на методи са СДН, само што је уместо оптерећења, динамичким путем, конторлисано варирана угаона брзина коленастог вратила мотора, а у циљу брзог одређивања укупног момента инерције свих покретних делова мотора СУС.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу прегледа и детаљне анализе докторске дисертације под називом „**Повећање ефикасности испитивања мотора СУС применом динамичких метода**“, кандидата Предрага Мрђе, маг. инж. маш, Комисија за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације констатује да урађена дисертација представља оригиналан научни допринос у проучавању динамичког испитивања мотора СУС, да је дисертација написана према свим стандардима научно-истраживачког рада и да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Машинског факултета Универзитета у Београду.

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да прихвати овај Извештај, да дисертацију „**Повећање ефикасности испитивања мотора СУС применом динамичких метода**“ кандидата Предрага Мрђе, маг. инж. маш, заједно са овим Извештајем стави на увид јавности у складу са законским одредбама, и да потом целокупни материјал упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Београд, 03.07.2020. год.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

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

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

др Драган Кнежевић, доцент
Универзитет у Београду, Машински факултет

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

др Радивоје Пешић, редовни професор
Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број: 665/4
Датум: 09.07.2020. године
Београд, Краљице Марије бр. 16

На основу члана 40. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 88/2017 и 27/2018-др. закон), члана 48. Правилника о докторским студијама, члана 64. Статута Машинског факултета (број 1450/4 од 14.06.2018. године) и члана 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета, Наставно-научно веће на седници одржаној 09.07.2020. године, донело је

ОДЛУКУ

Усваја се реферат Комисије о урађеној докторској дисертацији **„ПОВЕЋАЊЕ ЕФИКАСНОСТИ ИСПИТИВАЊА МОТОРА СУС ПРИМЕНОМ ДИНАМИЧКИХ МЕТОДА“** студента **ПРЕДРАГА МРЂЕ**, маг. инж. маш.

Јавна одбрана докторске дисертације обавиће се по добијању сагласности Универзитета у Београду.

Универзитет у Београду је својом Одлуком број 61206-833/2-20 од 04.06.2020. године, дао сагласност на предлог теме докторске дисертације.

Објављени радови студента у часописима међународног значаја:

Научни радови у истакнутим међународним часописима, категорије M22

1. **Mrđa P.**, Miljić N., Popović S., Kitanović M.: Continuous Slow Dynamic Slope Approach for Stationary Base Internal Combustion Engine Mapping, *Thermal Science*, Volume 24, Issue 1, Pages: 147158, doi: 10.2298/TSCI190308171M, ISSN: 2334-7163, 2019. (IF=1.541 за 2018.)

Научни радови у међународним часописима, категорије M23

2. 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.)

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.)

Одлуку доставити: студенту, ментору, Катедри за моторе и архиви Факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Радивоје Митровић