

Образац 2.

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)

121/2

(Број захтева)

24.01.2013.године

(Датум)

З А Х Т Е В

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:

СЛОБОДАНА (Јован) ПОПОВИЋА

(име, име једног од родитеља и презиме)

КАНДИДАТ **СЛОБОДАН (Јован) ПОПОВИЋ**

(име, име једног од родитеља и презиме)

Пријавио је докторску дисертацију под називом:

ИСТРАЖИВАЊЕ И РАЗВОЈ МЕТОДЕ ЗА АНАЛИЗУ РАДНОГ ПРОЦЕСА МОТОРА НА ОСНОВУ МЕРЕЊА ТРЕНУТНЕ УГАОНЕ БРЗИНЕ КОЛЕНАСТОГ ВРАТИЛА

Универзитет је дана 13.03.2009. год. својим актом под бр. 612-25/25/09 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

ИСТРАЖИВАЊЕ И РАЗВОЈ МЕТОДЕ ЗА АНАЛИЗУ РАДНОГ ПРОЦЕСА МОТОРА НА ОСНОВУ МЕРЕЊА ТРЕНУТНЕ УГАОНЕ БРЗИНЕ КОЛЕНАСТОГ ВРАТИЛА

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата: **СЛОБОДАНА (Јован) ПОПОВИЋА**

(име, име једног од родитеља и презиме)

Образована је на седници одржаној 27.12.2012 године, одлуком факултета под бр. 2499/2, у саставу:

Име и презиме члана комисије	звање	научна област	установа у којој је запослен
1. Др Мирољуб Томић	Редовни професор	Мотори	Машински факултет Београд
2. Др Мирољуб Ацић	Професор емеритус	Сагоревање, горива, Уређаји за сагоревање, Енергија и заштита животне средине	Машински факултет Београд
3. Др Александар Венцл	Ванредни професор	Технологија материјала	Машински факултет Београд
4. Др Радивоје Пешић	Редовни професор	Мотори	Факултет инжењерских наука у Крагујевцу

Наставно-научно веће факултета прихватило је извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана 24.01.2013. године.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић

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: 121/2
Датум: 24.01.2013. године
Београд, Краљице Марије 16

На основу чл. 128. Закона о високом образовању и извештаја Комисије у саставу: Проф.др Мирољуб Томић, ментор, др Мирољуб Аџић, професор емеритус, проф.др Александар Венцл и проф.др Радивоје Пешић, ФИН Крагујевац о оцени докторске дисертације „Истраживање и развој методе за анализу радног процеса мотора на основу мерења тренутне угаоне брзине коленастог вратила“ докторанта мр Слободана Поповића, дипл.инж.маш., Наставно-научно веће Машинског факултета на седници одржаној 24.01.2013. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Усваја се извештај за оцену и одбрану докторске дисертације **„ИСТРАЖИВАЊЕ И РАЗВОЈ МЕТОДЕ ЗА АНАЛИЗУ РАДНОГ ПРОЦЕСА МОТОРА НА ОСНОВУ МЕРЕЊА ТРЕНУТНЕ УГАОНЕ БРЗИНЕ КОЛЕНАСТОГ ВРАТИЛА“** докторанта **МР СЛОБОДАНА ПОПОВИЋА**, дипл.инж.маш.

Одобрава се одбрана докторске дисертације, пошто је докторска дисертација са извештајем Комисије за оцену и одбрану била стављена на увид јавности у трајању од 30 дана, па како је после свих разматрања на ННВ М.Ф. на крају извештај Комисије коначно усвојен, доставља се Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду да да сагласност на извештај о урађеној докторској дисертацији.

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

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић

**Предмет: Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата
Мр Слободана Ј. Поповића, дипл.инж.маш.**

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета у Београду бр. 2499/2 од 27.12.2012. именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Мр Слободана Ј. Поповића, дипл.инж.маш., под називом: „ИСТРАЖИВАЊЕ И РАЗВОЈ МЕТОДЕ ЗА АНАЛИЗУ РАДНОГ ПРОЦЕСА МОТОРА НА ОСНОВУ МЕРЕЊА ТРЕНУТНЕ УГАОНЕ БРЗИНЕ КОЛЕНАСТОГ ВРАТИЛА”, о којој подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Увод

1.1 Наслов и обим докторске дисертације

Докторска дисертација кандидата Мр Слободана Ј. Поповића, дипл.инж.маш., под називом „ИСТРАЖИВАЊЕ И РАЗВОЈ МЕТОДЕ ЗА АНАЛИЗУ РАДНОГ ПРОЦЕСА МОТОРА НА ОСНОВУ МЕРЕЊА ТРЕНУТНЕ УГАОНЕ БРЗИНЕ КОЛЕНАСТОГ ВРАТИЛА”, написана је по упутству за формирање репозиторијума докторских дисертација Универзитета у Београду са текстом на српском језику, на укупно 338 нумерисаних страна. Рад је изложен у укупно 12 поглавља, са датим списком литературе.

1.2. Хронологија одобравања израде дисертације

Кандидат Мр Слободан Ј. Поповић, дипл. инж. маш., пријавио је тему докторске дисертације под називом „ИСТРАЖИВАЊЕ И РАЗВОЈ МЕТОДЕ ЗА АНАЛИЗУ РАДНОГ ПРОЦЕСА МОТОРА НА ОСНОВУ МЕРЕЊА ТРЕНУТНЕ УГАОНЕ БРЗИНЕ КОЛЕНАСТОГ ВРАТИЛА” 04.12.2008. године (арх. бр. 1306/1), и за ментора је предложио проф. др Мирољуба Томића. На основу пријаве кандидата, Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду седници од 17.12.2008. г. на основу одлуке Катедре за моторе, доносило је одлуку о именовању Комисије за подношење извештаја о прихватању теме докторске дисертације и њене научне заснованости у саставу: др Мирољуб Томић, ред.проф. (ментор), др Милош Цветић, доцент, др Радивоје Пешић, ред.проф.

На основу извештаја Комисије (арх. бр. 1435/1) од 17.12.2008. г., Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду на седници одржаној 25.12.2008. г., доноси одлуку (арх. бр. 1435/2), којом прихвата предлог о испуњености услова о научној заснованости теме докторске дисертације. Машински факултет поднело је захтев Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, које је на седници одржаној 13.03.2009. г. донело одлуку о сагласности на предлог теме докторске дисертације Мр Слободана Ј. Поповића, дипл.инж.маш. (одлука бр. 612-25/25/09), а на основу чега је Декан Машинског факултета у

Београду донео закључак (арх. бр. 386/1 од 08.04.2009. г.) о одобравању рада на предметној дисертацији под менторством проф. др Мирољуба Томића.

1.3. Место дисертације у одговарајућој научној области

Докторска дисертација „ИСТРАЖИВАЊЕ И РАЗВОЈ МЕТОДЕ ЗА АНАЛИЗУ РАДНОГ ПРОЦЕСА МОТОРА НА ОСНОВУ МЕРЕЊА ТРЕНУТНЕ УГАОНЕ БРЗИНЕ КОЛЕНАСТОГ ВРАТИЛА” припада области техничких наука (машинство) и ужој научној области Мотори са унутрашњим сагоревањем.

1.4. Биографски подаци о кандидату

Име (уме оца) и презиме	Слободан (Јован) Поповић
Датум рођења:	04.12.1967. г
Место рођења:	Београд, Србија
Породично стање:	ожењен, отац једног детета

Школовање

1974-1982. г	Завршена основна школа у Београду са одличним успехом, носилац више диплома за успехе на школским такмичењима.
1982-1986. г	Математичко-техничка средња школа "Михаило Петровић-Алас" (IX београдска гимназија) у Београду; носилац дипломе Никола Тесла.
1992-1998. г	Машински факултет Универзитета у Београду, одсек Мотори СУС; просечна оцена током студија 8.70 (и 70/100).
март 1994. г	Одбрањен дипломски рад из предмета "Конструкција мотора" под насловом "Усавршавање мотора ДМБ 1.4 l применом променљиве шеме развода", са оценом 10 (десет), ментор проф. Др Стојан Петровић.
1994-1998. г	Магистарске студије, Универзитет у Београду, Машински факултет, усмерење – мотори СУС.
октобар, 1999. г	Одбрањен магистарски рад под насловом "Истраживање метода експерименталног одређивања емисије честица код дизел-мотора", ментор Др Стојан Петровић.
2005. г	Завршен курс за коришћење основних софтверских алата за пројектовање и развој аквизиционих и управљачких апликација на платформи National Instruments, LabVIEW Basics I: Introduction, Basics II: Development, (организација National Instruments Slovenija i Uno-LUX Београд).
2012. г	LMS Imagine.Lab AMESim - Driving performance, fuel economy and emissions, обука у LMS центру у Минхену, СР Немачка

Искуство у истраживањима и пословима наставе:

1994-1999	асистент-приправник на Катедри за моторе на Машинском факултету Универзитета у Београду
2005-2013	асистент на Катедри за моторе на Машинском факултету Универзитета у Београду
1994-	истраживач у 13 националних научних пројеката финансираних од стране Министарства просвете и науке Републике Србије, као и на заједничком пројекту Машинског факултета у Београду и Пекиншког технолошког института (BIT)

Објавио је 21 рад у зборницима радова научних скупова међународног и националног значаја, као и у референтном међународном часопису. Поред тога, четири рада излагана на међународном скупу Мотори и Моторна возила (Крагујевац, октобар 2012. г) прихваћена су за објављивање и у посебном издању часописа MVM (Motor Vehicles & Mobility) током 2013. г. Учествовао је у реализацији пет техничких решења.

Поседује активно знање енглеског као и пасивно знање немачког и италијанског језика.

Члан је Комисије КС М070 (Мотори са унутрашњим сагоревањем), Института за стандардизацију Србије.

2. Опис дисертације

2.1. Структура и садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Мр Слободана Ј. Поповића, дипл. инж. маш., под називом „ИСТРАЖИВАЊЕ И РАЗВОЈ МЕТОДЕ ЗА АНАЛИЗУ РАДНОГ ПРОЦЕСА МОТОРА НА ОСНОВУ МЕРЕЊА ТРЕНУТНЕ УГАОНЕ БРЗИНЕ КОЛЕНАСТОГ ВРАТИЛА” изложена је на 338 страна и садржи 385 једначина, 102 слике и дијаграмских приказа, 15 табела и 215 коришћених референтних литературних извора. Докторску дисертацију чине следећих дванаест поглавља и списак литературе:

1. Увод
2. Модел радног процеса мотора
3. Модел преноса топлоте
4. Моделирање струјања кроз пригушна места
5. Модел ослобађања топлоте
6. Термодинамичке карактеристике радне материје
7. Модел механичких губитака мотора
8. Динамика мотора
9. Идентификација параметара модела радног процеса мотора
10. Методологија експерименталног истраживања
11. Резултати истраживања
12. Закључак

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном делу текста дисертације приказан је осврт на значај анализе радног процеса мотора СУС и спреге метода анализе и нумеричких симулација радног процеса. Приказане

су основне карактеристике, предности и недостаци у примени директних детерминистичких и стохастичких метода анализе радног процеса. Наглашен је значај системског приступа, односно индиректне анализе радног процеса заснованог на симултаној идентификацији параметара модела радног процеса минимизацијом функционала грешке моделиране и мерене величине. У наставку је приказан детаљан осврт на стање технике у области анализе радног процеса мотора СУС на основу тока тренутне угаоне брзине из чега су проистекле основне смернице за истраживање приказано у дисертацији. Уочено је да највећи део проблема проистиче из детерминистичког приступа и чињенице да се у највећем броју случајева свесно занемарује утицај триболошких феномена и систематских грешака у поступку мерења угаоне брзине. Дат је кратак приказ основних мотива и циљева, а на крају уводног дела, у сажетој форми приказана је структура дисертације.

У првом делу другог поглавља приказане су и анализиране све кључне претпоставке неопходне за развој модела радног процеса мотора. У наставку, приказана је детаљна анализа доступних техника за постављање основне структуре модела радног процеса мотора, чиме је обухваћен и детаљан критички осврт на кључне недостатке најчешће коришћеног двозонског нултодимензионалног Фергусоновог (Ferguson) модела. У другом делу приказан је детаљан општи поступак извођења комплетног система обичних диференцијалних једначина за нултодимензионални двозонски модел бензинског мотора на основу Хаусенових (Hausen) поставки.

У трећем поглављу пажња је посвећена феномену преноса топлоте током одвијања радног циклуса мотора. Уместо уобичајеног, арбитарног приступа, који се најчешће своди на избор једног од доступних модела за прорачун коефицијента преноса топлоте као што су Анандов (Annand), Вошнијев (Woschni), Ајхелбергов (Eichelberg) или Хоенбергов (Hohenberg), у овом раду је најпре извршена опсежна анализа најчешће коришћених модела и њихових најновијих деривата. Пажња је посвећена тачности, проблему фазног померања у угаоном домену, и коначно, компатибилности са основном поставком модела радног процеса. Разлог за значајну пажњу која је у овом раду посвећена само једном од феномена, лежи у чињеници да тачност израчунавања коефицијента преноса топлоте, не само вредностима већ и током у угаоном домену (фазним померањем), пресудно утиче на веродостојност симулације радног процеса. Уобичајено скалирање, односно линеарно подешавање коефицијента преноса топлоте, губи смисао уколико постоји фазно померање коефицијента преноса топлоте у угаоном домену, чему доприноси недовољно поуздан и транспарентан начин одређивања струјног члана. На основу анализе и поређења релевантних модела према резултатима из литературе, у раду је примењен најновији модел Вошни–Ченг, који је развијен за потребе симулација код бензинских мотора са директним убризгавањем, али је верификован и за режиме рада са хомогеном смешом. У завршном делу дати су компатибилни модели за одређивање површине квашења за сваку од зона (продукти и несагорела смеша) као и апроксимациони модел Аткинса (Atkins) и Френча (French) за иницијализацију почетних вредности температура појединих делова површине коморе.

У четвртном поглављу дат је приказ основних метода за прорачун струјања кроз пригушна места. Осим приказа и критичког осврта на неке аспекте примене претпоставке о изентропском струјању стишљивог гаса, приказана је нова метода за одређивање геометријског проточног пресека на клипном прстену комбинацијом модела Хохенберг–АВЛ (Hohenberg-AVL) и Ванатонг (Wannatong).

Петим поглављем обухваћена је проблематика тока ослобађања топлоте. Поред основног приказа Виеове (Wiebe) функције, приказани су апроксимациони модели Кзалнера (Csallner), Вита (Witt), Линстрема (Lindström) и Бонатесте (Bonatesta) за израчунавање параметра облика и дужине трајања сагоревања у угаоном домену у функцији основних радних и регулационих параметара мотора. Овом проблему посвећена је пажња са идејом да се при оптимизацији параметара Виеовог модела ослобађања топлоте итеративни поступак започне у непосредној околини очекиваних реалних вредности два кључна параметра.

Овакав приступ мотивисан је чињеницом да ће током извођења поступка оптимизације, заправо, идентификација бити обављана за сваки цилиндар посебно и да се због тога мора обезбедити поступак за брзу конвергенцију. У том смислу предложен је и верификован комбиновани (спрегнути) поступак Линдстрем–Бонатеста.

У шестом поглављу дата је кратка анализа и критички осврт на ограничене могућности примене неких најчешће коришћених апроксимационих модела за израчунавање унутрашње енергије радне материје као што су Јустијев (Justi), Закаријасов (Zacharias), Кригер-Борманов (Kriger-Borman). Главни део поглавља односи се на конкретну примену принципа равнотежних концентрација. У оквиру тог дела приказана је критичка анализа 10-компонентног Фергусоновог (Ferguson) модела где је акценат стављен на изражене проблеме тачности и конвергенције, као и кратко поређење ефикасности израчунавања равнотежних концентрација применом Фергусоновог модела, 12-компонентног модела Оликара–Борман (Olikara-Borman) и 14-компонентног Депчиковог (Depcik) модела у односу на референтне програме (NASA TRANS 72). У наставку поглавља приказана је метода равнотежних концентрација за 12 компонената.

Седмо поглавље посвећено је развоју сета модела за симулацију отпора трења у триболошким склоповима мотора и снаге потребне за рад помоћних уређаја. Као основа за развој модела искоришћен је Таразин (Taraza) приступ за дизел-мотор. У основном делу дат је критички осврт на уочене пропусте и грешке у полазном моделу. Модел је допуњен и прилагођен специфичностима бензинских мотора, пре свега у погледу израчунавања снаге и момента потребног за погон помоћних уређаја (систем паљења и убризгавања). Развијени су и примењени кориговани модели за израчунавање механичких губитака на клипним прстеновима и плашту клипа на основу Стрибековог (Stribeck) броја, у лежајевима са хидродинамичким подмазивањем применом Букерове (Booker) теорије покретљивости, као и модел за еласто-хидродинамичко подмазивање у контакту брег – подизач за шта су као основа послужили радови Доусона (Dowson), Теодорескуа (Teodorescu) и Стачовијака (Stachowiak). У завршном делу приказане су основне методе за израчунавање неопходних вредности температурског и притисног коефицијента вискозности мазива применом познатих израза Менинга (Manning), и Баруса (Barus), респективно.

У осмом поглављу приказан је поступак примене Њутновог (Newton) закона на динамички систем коленасто вратило мотора – потрошач (динамометар) и извођење диференцијалне једначине за израчунавање угаоне брзине коленастог вратила за торзионо еластичан систем. У наставку је приказана анализа проблема торзионих осцилација и примењен је поступак редукције модела у складу са истраживањима доступним у литератури.

У деветом поглављу дат је приказ поступка идентификације параметара математичког модела радног процеса мотора СУС. С обзиром на то да је та тематика детаљно приказана у домаћој литератури, у овом поглављу приказане су само основе оптимизационих поступака Гаус-Њутн (Gauss-Newton) и Левенберг–Маркварт (Levenberg-Marquardt) које су од значаја за случај нелинеарних система, какав се користи у овом раду.

У десетом поглављу дат је кратак приказ експерименталне инсталације и основних поступака коришћених за анализу индикаторског дијаграма и корекцију систематских грешака сигнала угаоне брзине.

У једанаестом поглављу приказан је тест осетљивости симулације на промену кључних улазних параметара. У другом делу тестирана је робусност симулације у условима идентификације параметара модела за различите врсте одступања и систематских грешака, као и резултати симултане идентификације параметара модела радног процеса за референтни цилиндар на основу минимизације функционала грешке симулиране и мерене угаоне брзине, и функционала грешке симулираног и мереног притиска у цилиндру за неколико карактеристичних квазистационарних радних режима мотора.

У завршном, дванаестом поглављу приказан је кратак осврт на резултате истраживања, уочене проблеме и ограничења и дати најважнији закључци и наведене могућности и смернице за даље истраживање у овој области.

На крају је наведена литература, која је коришћена током спроведених истраживања и рада на реализацији докторске дисертације.

3. Оцена дисертације

3.1. Савременост, оригиналност и значај

Докторска дисертација кандидата Мр Слободана Ј. Поповића, дипл.инж.маш., под називом „ИСТРАЖИВАЊЕ И РАЗВОЈ МЕТОДЕ ЗА АНАЛИЗУ РАДНОГ ПРОЦЕСА МОТОРА НА ОСНОВУ МЕРЕЊА ТРЕНУТНЕ УГАОНЕ БРЗИНЕ КОЛЕНАСТОГ ВРАТИЛА” представља оригиналан и савремен приступ у поступку анализе радног процеса мотора СУС.

Оригиналност докторске дисертације се огледа и у приступу којим се из сигнала тренутне угаоне брзине врши индиректна идентификација параметара математичког модела ослобађања топлоте током сагоревања минимизацијом функционала грешке моделиране и мерене вредности тренутне угаоне брзине коленастог вратила. У овом поступку користе се комплетни, детаљни аналитички модели радног процеса мотора и механичких губитака у угаоном домену. Овакав детаљан приступ, комбинован са развијеним методама обраде и корекције мерених сигнала притиска у цилиндру и угаоне брзине коленастог вратила, представља значај помак у односу на све методе приказане у наведеним и анализираним литературним изворима.

Савременим приступом у експерименталном делу истраживања, на коме је кандидат радио током израде ове докторске дисертације, развијени су оригинални алгоритми за обраду и анализу података, али и нове софтверске и хардверске компоненте и мерни ланци, који су коришћени током испитивања предметног мотора. Докторска дисертација представља јединствени подухват у примени напредних техника математичког моделирања мотора као динамичког система на српском језику, што је свакако значајно на националном нивоу. Демонстриран детаљан приступ и остварени резултати прате ниво истраживања у овој области и чине ову докторску дисертацију значајном за научно-стручну јавност у националним и међународним оквирима.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У докторској дисертацији приказан је комплексан, мултидисциплинаран приступ у поступку моделирања, анализе и идентификације динамичких процеса у мотору СУС. У складу са тим, коришћен је велики број савремених и релевантних литературних извора који покривају све области и проблеме приказане у дисертацији. Преглед литературе обухвата изворе из области теорије радног процеса, феномена ослобађања топлоте током сагоревања, феномене преноса топлоте у моторима, моделирања састава и карактеристика радне материје, струјања, динамике моторског механизма, теорије и анализе динамичких сигнала, као и извора везаних за примену нумеричких оптимизационих метода.

Највећи део коришћених извора је новијег датума који су објављени у референтним научно-стручним часописима високог ранга, што потврђује савременост и квалитет у општем приступу и анализи проблема разматраних у докторској дисертацији. Велики део наведене литературе кандидат је користио за свеобухватну анализу и критички осврт на стање у појединим областима истраживања, посебно у области која се дотиче анализе тока угаоне брзине и њене примене у реконструкцији тока притиска у цилиндру. Посебно се истиче

критичка анализа постојећих метода у моделирању феномена преноса топлоте у мотору и појединих триболошких феномена где је кандидат уочио и кориговао недоследности у моделима приказаним у литератури. Критичка анализа постојећих метода за директну реконструкцију тока притиска представљала је основу за приказ основне идеје дисертације - примену иновативне методе индиректне идентификације параметара математичког модела радног процеса мотора. Истицањем најважнијих резултата, презентованих у коришћеној литератури, дат је релевантан приказ постојећег стања у свакој од појединачних области моделирања и анализе сигнала које су биле предмет истраживања кандидата током рада на дисертацији. Коришћене референце представљају избор савремене и релевантне литературе која приказује актуелно стање у предметној области истраживања у свету, али које указују и на могуће правце даљег научног рада.

3.3. Анализа примењених научних метода и њихова адекватност за спроведено истраживање

За реализацију постављених циљева истраживања, кандидат је користио мултидисциплинарни приступ. За развој математичког модела за симулацију мотора као динамичког, стохастичког и нелинеарног система коришћени су детаљни аналитички подмодели радног процеса у цилиндру, триболошки подмодели за симулацију механичких губитака, као и подмодел система мотор-динамометар са једном степеном слободе. За идентификацију параметара модела коришћене су нумеричке методе оптимизације засноване на робустном алгоритму Левенберг-Маркварт (минимизација функционала грешке моделиране и мерене величине).

За анализу и обраду сигнала индицираног притиска у цилиндру мотора чији су резултати коришћени као референтни у овој дисертацији, уместо детерминистичког приступа, најчешће референцираног у литератури, кандидат је применио систематски, индиректни приступ базиран на идентификацији параметара модела процеса минимизацијом функционала грешке моделираног и мереног тока притиска. Овакав поступак омогућава симултану идентификацију параметара модела процеса и корекцију систематских грешака услед фазног (угаоног) померања и одступања нултог сигнала сензора притиска. У том смислу, примењени поступци идентификације параметара модела процеса на основу мерене угаоне брзине и индицираног притиска као референтног поступка, потпуно су упоредиви и међусобно компатибилни.

За обраду измереног тока тренутне угаоне брзине и компензацију грешака услед геометријских одступања инкременталног диска, примењена је унапређена метода заснована на комбинацији кинематске анализе, математичког модела процеса у цилиндру и техникама оптимизације. Током експерименталних лабораторијских истраживања на предметном бензинском мотору, интензивно су коришћене најсавременије методе у мерењима, аквизицији и обради сигнала, као и поступцима калибрације мерних ланаца.

3.4. Оцена примењивости и верификације остварених резултата

Резултати приказани у овој дисертацији могу се практично применити у различитим областима истраживања и развоја мотора СУС. У раду је демонстрирана оригинална метода анализе радног процеса у појединачним цилиндрима вишецилиндарског мотора на основу јединственог сигнала тренутне угаоне брзине коленастог вратила мотора. Приказан поступак се заснива на анализи експерименталног сигнала добијеног неинвазивним поступком, што је очигледна предност у односу на конвенционалне методе анализе процеса заснованог на индицирању притиска у цилиндру мотора СУС. Метода пружа потребне информације о параметрима математичког модела процеса ослобађања топлоте током сагоревања, као и

информацију о корекцији коефицијента прелаза топлоте током високопритисног дела циклуса у сваком од појединачних цилиндара вишецилиндарског мотора применом јединственог сензора. Добијени резултати, у квалитативном смислу потпуно су упоредиви са резултатима добијеним референтном методом – индиректном идентификацијом истих параметара на основу минимизације функционала грешке моделираног и измереног тока притиска у референтном цилиндру. Одступања у квантитативном смислу су у оквиру очекиваних граница и потпуно су упоредива са резултатима примене анализираних и примењених апроксимационих модела. Ипак, приказана метода је изузетно захтевна у погледу потребних рачунарских ресурса. У том смислу, реална, шира примена приказаног поступка зависиће од даљег рада на побољшању и оптимизацији софтверских решења и развоја хардверских компонената. Поједини резултати приказани у дисертацији се могу директно применити у унапређењу постојећих метода мерења притиска у цилиндру (систематски приступ у идентификацији параметара модела) и тренутне угаоне брзине коленастог вратила мотора (синтеза математичког модела процеса, модела геометријских одступања инкременталног диска и поступка идентификације). Резултати приказани у дисертацији верификовани су на обимном сету експериментално прикупљених података.

3.5. Оцена 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. Остварен научни допринос

4.1. Приказ оствареног научног доприноса

Остварени научни допринос, настао као резултат истраживања у оквиру докторске дисертације „ИСТРАЖИВАЊЕ И РАЗВОЈ МЕТОДЕ ЗА АНАЛИЗУ РАДНОГ ПРОЦЕСА МОТОРА НА ОСНОВУ МЕРЕЊА ТРЕНУТНЕ УГАОНЕ БРЗИНЕ КОЛЕНАСТОГ ВРАТИЛА”, огледа се у следећем:

- Развијен је комплетан, детаљан модел мотора као стохастичког динамичког система синтезом флексибилног нултодимензионалног двозонског модела радног процеса бензинског мотора, детаљног динамичког модела механичких губитака и динамичког модела моторског механизма са једним степеном слободе;
- Предложена је побољшана метода за моделирање протока гаса кроз незаптивена места цилиндарске коморе у зони клипних прстенова;
- Развијен је и примењен детаљан, свеобухватан динамички модел механичких губитака мотора у свим кључним триболошким системима мотора, применом основних аналитичких метода заснованих на Стрибековој теорији подмазивања, хидродинамичкој теорији подмазивања и еласто-хидродинамичкој теорији подмазивања, као и модел за одређивање снаге потребне за рад помоћних система мотора (системи паљења и формирања смеше);
- Развијене су оригиналне компоненте мерних ланаца за испитивање мотора на пробном столу за моторе, као и унапређене методе обраде мерних сигнала;

- Предложена је и демонстрирана побољшана метода за компензацију систематских грешака у мерењу тренутне угаоне брзине коленастог вратила заснована на комбинацији детаљног математичког модела радног процеса мотора, анализе геометрије инкременталног диска и метода нумеричке оптимизације;
- Демонстриран је оригиналан приступ у идентификацији параметара модела радног процеса у појединачним цилиндрима вишецилиндарског бензинског мотора на основу јединственог сигнала тренутне угаоне брзине коленастог вратила применом поступка минимизације функционала грешке моделиране и мерење тренутне угаоне брзине коленастог вратила;
- Демонстрирана је задовољавајућа тачност идентификације параметара модела радног процеса мотора применом алтернативне, неинванзивне методе засноване на мерењу тренутне угаоне брзине у поређењу са вредностима добијеним директном идентификацијом из сигнала индицираног притиска у цилиндру мотора;

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Основни циљ истраживања, везан за формирање низа неопходних математичких модела, којима се симулирају кључни динамички процеси у мотору СУС и њихову синтезу са робустним техникама нумеричке оптимизације је испуњен и успешно демонстриран на сету експериментално добијених података. Истраживање и резултати, приказани у оквиру ове докторске дисертације, засновани су на мерењима угаоне брзине мерним ланцем, чија је угаона резолуција упоредива са резолуцијом мерних ланаца који су доступни на моторима масовне производње и представљају саставни део управљачког система савременог мотора. У том смислу поједностављење мерног поступка у односу на онај који се користи код конвенционалних метода индицирања притиска у цилиндру значајно и представља несумњиву предност методе.

Демонстрирана је висока тачност поступка у квалитативном смислу, док је у квантитативном смислу, остварена тачност нешто нижа, али прихватљива у поређењу са референтном методом заснованом на сложенем, инвазивном поступку индицирања притиска у појединачним цилиндрима мотора. тачност добијених резултата је у оквиру тачности која се добија применом сложених апроксимационих модела.

Истраживање приказано у дисертацији ограничено је на квазистационарне режиме, а методологија је потпуно упоредива са оном која се користи за конвенционалне методе обраде сигнала индицираног притиска. У том смислу, даља истраживања би требало усмерити на примену методе за анализу појединачних циклуса и феномене везане за циклусне варијације у сагоревању код бензинског мотора, као и примена поступка за анализу процеса током динамичких промена радних режима. Метода развијена током рада на дисертацији је демонстрирана на примеру конвенционалног бензинског мотора са хомогеном смешом, али се уз извесне, мање модификације развијених модела, пре свега радног процеса, исти поступак може применити и за случајеве бензинских мотора са нехомогеном смешом као и дизел-моторе. Метода приказана у дисертацији ослања се на детаљне моделе процеса и триболошких феномена, па се у том смислу, евентуална побољшања могу очекивати применом детаљнијих модела динамике торзионо еластичног моторског механизма.

4.3. Очекивана примена резултата у пракси

Ипак, приказана метода је изузетно захтевна у погледу потребних рачунарских ресурса. У том смислу, реална, шира примена приказаног поступка зависиће од даљег рада на побољшању и оптимизацији софтверских решења и развоја хардверских компонената.

Поједини резултати приказани у дисертацији се могу директно применити у унапређењу постојећих метода мерења притиска у цилиндру (систематски приступ у идентификацији параметара модела) и тренутне угаоне брзине коленастог вратила мотора (синтеза математичког модела процеса, модела геометријских одступања инкременталног диска и поступка идентификације). Резултати приказани у дисертацији верификовани су на обимном сету експериментално прикупљених података.

Резултати истраживања и методе који су приказани у дисертацији могу се практично применити у анализи радног процеса мотора. Уз извесна побољшања и оптимизацију коришћених софтверских решења, може се очекивати побољшање ефикасности методе и смањење утршка рачунарских ресурса. Поред анализе радног процеса, приказане методе се уз одговарајуће модификације могу користити за потребе праћења рада и дијагностику мотора с обзиром да омогућавају анализу рада појединачних цилиндара вишецилиндарског мотора. Овај аспект примене методе отвара посебан простор за даља истраживања и унапређење поступака моделирања и анализе процеса.

4.4. Верификовани научни доприноси

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

M23 Научни радови у међународним часописима (SCI-Web of Science®)

- [1] Popović S. J., Tomić M. V.: Possibilities to identify engine combustion model parameters by analysis of the instantaneous crankshaft angular speed, Thermal Science (ISSN 0354-9836), OnLine-First (00):6-6, 2013, DOI: 10.2298/TSCI120907006P
<http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0354-9836/2013%20OnLine-First/0354-98361300006P.pdf>
(Science Citation Index-Web of Science® – IF = 0,779 (2011) → M23; извор KoBSON)
- [2] Tomić, M. V., Popović, S. J., Miljić, N. L., Petrović, S. V., Cvetić, M. R., Knežević, D. M., & Jovanović, Z. S., A quick, simplified approach to the evaluation of combustion rate from an internal combustion engine indicator diagram, Thermal Science, Vol. 12, No. 1, pp. 85-102, 2008., <http://thermalscience.vinca.rs/2008/1/7> ; (2008 → M23; извор KoBSON)

Овај рад је цитиран у:

Pešić, R.B., Milojević S.T. & Veinović, S.P., *Benefits and challenges of variable compression ratio at diesel engines*, Thermal Science, Vol. 14, No. 4, pp. 1063-1073, 2010.

Khalilarya, S. & Javadzadeh, M., *Developing of a new comprehensive spark ignition engines code for heat loss analysis within combustion chamber walls*, Thermal Science, Vol. 14, No. 4, pp. 1013-1025, 2010.

M33 Саопштења са међународних скупова штампана у целини

- [3] Tomić, M., Petrović, S., Popović, S., Miljić, N., Dual port induction system for DMB 1.4 MPI Engine, Proceedings of the 10th International conference on accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology "DEMI 2011", pp. 651-659, Banja Luka, Bosnia And Herzegovina, 2011.

- [4] Popović, S., Miljić, N., Cvetić, M., Tomić, M., Nauparac, D., Hydraulic hybrid technology review - perspectives and benefits in urban traffic, Proceedings of the International Congress Motor Vehicles & Motors 2010 (MVM 2010), ISBN 978-86-86663-57-3, pp. 366-374, Kragujevac, October 2010, Serbia, 2010.
- [5] Томић, М., Поповић, С., Миљих, Н., Петровић, С., Стајић, В., Примена турбопуњења на мотору ДМБ 1.4 MPI, 9. конференција о достигнућима електротехнике, машинства и информатике, "ДЕМИ 2009", зборник радова, стр. 541-546, Бања Лука, Босна и Херцеговина, 2009.
- [6] Томић, М., Петровић, С., Поповић, С., Миљих, Н., Развој бензинског мотора ДМБ 1.4 са турбопуњењем и електронским убризгавањем, 14. симпозијум термичара Србије, зборник радова, IV.8, стр. 353-362, Соко Бања, Србија, 2009.
- [7] 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, Proceedings of the International Congress Motor Vehicles & Motors 2012 (MVM 2012), ISBN 978-86-86663-91-7, pp. 173-186 Kragujevac, October 2012, Serbia, 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, Proceedings of the International Congress Motor Vehicles & Motors 2012 (MVM 2012), ISBN 978-86-86663-91-7, pp. 147-159, Kragujevac, October 2012, Serbia, 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, Proceedings of the International Congress Motor Vehicles & Motors 2012 (MVM 2012), ISBN 978-86-86663-91-7, pp. 159-173 Kragujevac, October 2012, Serbia, 2012.
- [10] Mrđa, P., Miljić, N., Kitanović, M., Popović, S., Tomić, M., Model based approach in Yamaha R6 Formula Student Engine control parameters optimisation, Proceedings of the International Congress Motor Vehicles & Motors 2012 (MVM 2012), ISBN 978-86-86663-91-7, pp. 137-147, Kragujevac, October 2012, Serbia, 2012.

M53 Рад у научном часопису

- [11] Томић, М., Петровић, С., Поповић, С., Миљих, Н., Развој бензинског мотора ДМБ 1.4 EFI са турбопуњењем, Застава, Часопис за науку у пракси, год. XXI, број 44, децембар 2009, стр. 15-19, ISBN 0352-292X, Крагујевац

M80 Научно-истраживачки, стручни и образовно-развојни пројекти – техничка решења

- [12] Поповић, С., Миљих, Н., 4-канални универзални модул за кондиционирање сигнала MSGA-41 (нови производ, M81): универзална појачивачка картица развијена као надоградња аквизиционих система за напајање и кондиционирање давача са мерним мостовима, терморезистивних давача и термопарова; развијена у пројекту 6380-TP МНТР Владе Републике Србије)
- [13] Петровић, М., Миљих, Н., Поповић С., Дистрибуирани аквизициони систем LTT-200 (нови производ, M81): вишеканални аквизициони систем за напајање давача и

кондиционирање сигнала са етернет преносом података; развијен у пројекту ПТР-2124 МНТР Владе Републике Србије)

- [14] Поповић С., Миљић Н., Масени протокомер за ваздух великог капацитета HCNFME-FME 5000 (мерни инструмент, М85): термални масени протокомер уз који је развијана и проширен капацитет инсталације за калибрацију протокомера по стандарду ISO5167; развијен у пројекту 6380-ТР МНТР Владе Републике Србије)
- [15] Поповић С., Миљић Н., Цветић М., Систем за континуирано мерење масеног протока горива FCMS-3000 (мерни инструмент, М85): мерни систем високе класе тачности за динамичко мерење масеног протока горива; развијен у пројекту 6380-ТР МНТР Владе Републике Србије)
- [16] Јурковић Т., Томић М., Петровић С., Цветић М., Поповић С., Миљић Н., Усисни систем мотора варијабилне геометрије "Dual Port" (прототип, М85): систем за варијацију попречног пресека усисних канала четвороцилиндарског мотора; развијен у пројекту 14074-ТР МНТР Владе Републике Србије)

5. Закључак и предлог

Докторска дисертација под називом „ИСТРАЖИВАЊЕ И РАЗВОЈ МЕТОДЕ ЗА АНАЛИЗУ РАДНОГ ПРОЦЕСА МОТОРА НА ОСНОВУ МЕРЕЊА ТРЕНУТНЕ УГАОНЕ БРЗИНЕ КОЛЕНАСТОГ ВРАТИЛА “ кандидата Мр Слободана Ј. Поповића, дипл.инж.маш., представља савремен и оригиналан научни допринос у области анализе радног процеса мотора СУС синтезом детаљних модела радног процеса, механичких губитака и динамике моторског механизма, напредних техника мерења и анализе сигнала динамичких појава у мотору и робустних техника нумеричке оптимизације. Дисертација пружа детаљан и свеобухватан теоријски приказ и анализу савремених техника и пратећих проблема у свим аспектима развоја и примене нултодимензионалних модела радног процеса бензинских мотора СУС као и метода моделирања механичких губитака у мотору у угаоном домену. Рад представља квалитетну основу за развој алтернативних неинвазивних метода анализе радног процеса мотора СУС као и дијагностичких метода заснованих на мерењу угаоне брзине коленастог вратила мотора

На основу онога што је приказано у докторској дисертацији и чињенице да је анализирана проблематика веома актуелна у научној јавности, Комисија констатује да је кандидат Мр Слободан Ј. Поповић, дипл. инж. маш., успешно завршио докторску дисертацију у складу са предвиђеним предметом и постављеним циљевима докторске дисертације.

На основу прегледа и оцене докторске дисертације кандидата

Мр Слободана Поповића, дипл.инж.маш.

са темом

ИСТРАЖИВАЊЕ И РАЗВОЈ МЕТОДЕ ЗА АНАЛИЗУ РАДНОГ ПРОЦЕСА МОТОРА НА ОСНОВУ МЕРЕЊА ТРЕНУТНЕ УГАОНЕ БРЗИНЕ КОЛЕНАСТОГ ВРАТИЛА

Комисија за оцену и одбрану закључује да је урађена докторска дисертација написана према свим стандардима и позитивној пракси у научно-истраживачком раду, као и то да испуњава

све услове предвиђене Законом о високом образовању и Статутом и Правилником о докторским студијама Машинског факултета у Београду.

Сходно члану 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета у Београду, Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да овај Извештај прихвати, дисертацију стави на увид јавности и упути извештај на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, а да се након тога кандидат позове на јавну одбрану.

Чланови Комисије:

У Београду, 21.01.2013. године

Др Мирољуб Томић, редовни професор, ментор
Машински факултет у Београду

Др Мирољуб Ацић, професор емеритус,
Машински факултет у Београду

Др Александар Венцл, ванредни професор
Машински факултет у Београду

Др Радивоје Пешић, редовни професор,
Факултет инжењерских наука у Крагујевцу

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број: 121/3
Датум: 24.01.2013.
Београд, Краљице Марије бр. 16

На основу члана 128. Закона о високом образовању и члана 12.2 Статута Машинског факултета, Наставно-научно веће на седници одржаној 24.01.2013. године, донело је

ОДЛУКУ

I Прихвата се извештај о позитивној оцени урађене докторске дисертације коју је поднео мр СЛОБОДАН ПОПОВИЋ и одобрава јавна одбрана дисертације по добијању сагласности од Универзитета, под насловом: „ИСТРАЖИВАЊЕ И РАЗВОЈ МЕТОДЕ ЗА АНАЛИЗУ РАДНОГ ПРОЦЕСА МОТОРА НА ОСНОВУ МЕРЕЊА ТРЕНУТНЕ УГАОНЕ БРЗИНЕ КОЛЕНАСТОГ ВРАТИЛА“

II Универзитет је дана 13.03.2009. године, својим актом број 612-25/25/09 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата.

III Радови кандидата у часопису међународног значаја:

[1] Popović S. J., Tomić M. V. Possibilities to identify engine combustion model parameters by analysis of the instantaneous crankshaft angular speed, Thermal Science (ISSN 0354-9836), OnLine-First (00):6-6, 2013, DOI: 10.2298/TSCI120907006P <http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0354-9836/2013%20OnLine-First/0354-98361300006P.pdf>, (Science Citation Index-Web of Science® – IF = 0,779 (2011) → M23; извор KoBSON)

[2] Tomić, M. V., Popović, S. J., Miljić, N. L., Petrović, S. V., Cvetić, M. R., Knežević, D. M., & Jovanović, Z. S., A quick, simplified approach to the evaluation of combustion rate from an internal combustion engine indicator diagram, Thermal Science, Vol. 12, No. 1, pp. 85-102, 2008., <http://thermalscience.vinca.rs/2008/1/7> ; (2008 → M23; извор KoBSON)

Одлуку доставити: кандидату, ментору, Катедри за моторе и архиви факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић