

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)

958/5
(Број захтева)

15.11.2012.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:

НЕНАДА (ЛАЗАР) МИЉИЋА

(име, име једног од родитеља и презиме)

КАНДИДАТ **НЕНАД (ЛАЗАР) МИЉИЋ**

(име, име једног од родитеља и презиме)

Пријавио је докторску дисертацију под називом:

ИСТРАЖИВАЊЕ ОПТИМАЛНОГ УПРАВЉАЊА СИСТЕМОМ ПАЉЕЊА ОТО-МОТОРА ПРИМЕНОМ ВЕШТАЧКИХ НЕУРОНСКИХ МРЕЖА

Универзитет је дана 13.03.2009. год. својим актом под бр. 612-25/26/09 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

ИСТРАЖИВАЊЕ ОПТИМАЛНОГ УПРАВЉАЊА СИСТЕМОМ ПАЉЕЊА ОТО-МОТОРА ПРИМЕНОМ ВЕШТАЧКИХ НЕУРОНСКИХ МРЕЖА

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата: **НЕНАДА (ЛАЗАР) МИЉИЋА**

(име, име једног од родитеља и презиме)

Образована је на седници одржаној 24.05.2012. године, одлуком факултета под бр. 958/2, у саставу:

Име и презиме члана комисије	звање	научна област	установа у којој је запослен
1. Др Мирољуб Томић	Редовни проф.	Мотори са унутрашњим сагоревањем	Машински факултет Београд
2. Др Зоран Миљковић	Редовни проф.	Производно машинство	Машински факултет Београд
3. Др Зоран Јовановић	Научни саветник	Мотори са унутрашњим сагоревањем	ИНН Винча

Наставно-научно веће факултета прихватило је извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана 11.10.2012. 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: 958/4
Датум: 11.10.2012. године
Београд, Краљице Марије 16

На основу чл. 128. Закона о високом образовању и извештаја Комисије у саставу: проф.др Милољуб Томић, ментор, проф.др Зоран Миљковић и др Зоран Јовановић, научни саветник ИНН Винча о оцени докторске дисертације „Истраживање оптималног управљања системом паљења ото-мотора применом вештачких неуронских мрежа“ докторанта мр Ненада Миљића, дипл.инж.маш., Наставно-научно веће Машинског факултета на седници одржаној 11.10.2012. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Усваја се извештај за оцену и одбрану докторске дисертације **„ИСТРАЖИВАЊЕ ОПТИМАЛНОГ УПРАВЉАЊА СИСТЕМОМ ПАЉЕЊА ОТО-МОТОРА ПРИМЕНОМ ВЕШТАЧКИХ НЕУРОНСКИХ МРЕЖА“** докторанта **МР НЕНАДА МИЉИЋА**, 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 Ненада Миљећа, дипл.инж.маш.

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета у Београду бр. 958/2 од 24.05.2012.г. именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Мр Ненада Миљећа, дипл.инж.маш., под називом: „ИСТРАЖИВАЊЕ ОПТИМАЛНОГ УПРАВЉАЊА СИСТЕМОМ ПАЉЕЊА ОТО-МОТОРА ПРИМЕНОМ ВЕШТАЧКИХ НЕУРОНСКИХ МРЕЖА”, о којој подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Увод

1.1 Наслов и обим докторске дисертације

Докторска дисертација кандидата Мр Ненада Миљећа, дипл.инж.маш., под називом „ИСТРАЖИВАЊЕ ОПТИМАЛНОГ УПРАВЉАЊА СИСТЕМОМ ПАЉЕЊА ОТО-МОТОРА ПРИМЕНОМ ВЕШТАЧКИХ НЕУРОНСКИХ МРЕЖА”, написана је по упутству за формирање репозиторијума докторских дисертација Универзитета у Београду са текстом на српском језику, на укупно 202 нумерисаних страна. Рад је изложен у укупно 9 поглавља, са датим списком литературе.

1.2. Хронологија одобравања израде дисертације

Кандидат Мр Ненад Миљећ, дипл. инж. маш., пријавио је тему докторске дисертације под називом „ИСТРАЖИВАЊЕ ОПТИМАЛНОГ УПРАВЉАЊА СИСТЕМОМ ПАЉЕЊА ОТО-МОТОРА ПРИМЕНОМ ВЕШТАЧКИХ НЕУРОНСКИХ МРЕЖА” 04.12.2008. године (арх. бр 1306/3) и за ментора је предложио проф. др Мирољуба Томића. На основу пријаве кандидата, Наставно-научног веће Машинског факултета у Београду је прихватило предлог, а на основу одлуке Катедре за моторе (арх. бр. 1306/1), именovalo Комисију 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 Зоран Миљковић, ред.проф., др Зоран Јовановић, научни саветник (ИНН Винча).

На основу извештаја Комисије (арх. бр. 1436/1) од 17.12.2008.г., Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду 25.12.2008.г. доноси одлуку (арх. бр.1436/2), 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 13.03.2009.г. донело одлуку да се даје сагласност на предлог теме докторске дисертације Мр Ненада Миљећа, дипл.инж.маш. (одлука бр. 612-25/26-09 од 14.03.2009.г.), а на основу чега је 08.04.2009.г. Декан Машинског факултета у Београду донео закључак (арх. бр. 386/1) о одобравању рада на предметној дисертацији под менторством проф. др Мирољуба Томића.

1.3. Место дисертације у одговарајућој научној области

Докторска дисертација „ИСТРАЖИВАЊЕ ОПТИМАЛНОГ УПРАВЉАЊА СИСТЕМОМ ПАЉЕЊА ОТО-МОТОРА ПРИМЕНОМ ВЕШТАЧКИХ НЕУРОНСКИХ МРЕЖА” припада области техничких наука (машинство) и ужој научној области Мотори са унутрашњим сагоревањем.

1.4. Биографски подаци о кандидату

Име и презиме: Ненад Лазара Милчић
Датум рођења: 20.07.1973.
Место рођења: Münster WF, СР Немачка
Породично стање: Ожењен, отац двоје деце

Школовање:

1980-1988	Основна школа у Борчи (Београд); носилац Вукове дипломе; ученик генерације; двоструки савезни првак у такмичењима из области машинске технике.
1988-1992	V београдска гимназија у Београду; носилац Вукове дипломе; ученик генерације.
1992-1998	Машински факултет Универзитета у Београду, одсек Мотори СУС; Просечна оцена током студија 9.55 (девет и 55/100).
18.06.1998.	Одбрањен дипломски рад из предмета "Конструкција мотора" под насловом "Пројектовање четворовентилског бензинског мотора од 1400 ццм", са оценом 10 (десет), ментор проф. Др Стојан Петровић; Најбољи дипломирани студент 1998.
1998-2000	Магистарске студије, Универзитет у Београду, Машински факултет, усмерење – мотори СУС
2000-2001	Школа за резервне официре саобраћајне службе, ВТ академија, Београд; Оцена 9 (девет).
18.02.2005.	Одбрањен магистарски рад под насловом "Испитивање динамичког понашања механичког регулатора дистрибутор пумпе високог притиска при нестационарном раду дизел мотора", ментор доц. Др Милош Цветић
2010	Certified LabVIEW Associate Developer (CLAD), National Instruments, USA
2012	LMS Imagine.Lab AMESim - Driving performance, fuel economy and emissions, обука, СР Немачка

Искуство у истраживањима и пословима наставе:

1995	Боравак на Универзитету у Вуперталу (СР Немачка), на Катедри за техничку механику и електромеханичке конструкције
1998-2005	асистент-приправник на Катедри за Моторе на Машинском факултету Универзитета у Београду
2005-2012	асистент на Катедри за Моторе на Машинском факултету Универзитета у Београду
Од 1998	истраживач у 8 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 9 радова у зборницима радова научних скупова међународног и националног значаја, као и у референтном међународном часопису. Додатна четири рада су прихваћена за излагање и објављивање у зборницима радова на међународним скуповима, који ће бити одржани у првој недељи октобра 2012. Учествовао је у реализацији пет техничких решења.

Поседује активно знање енглеског и немачког као и пасивно знање руског 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 Ненада Миљића, дипл. инж. маш., под називом „ИСТРАЖИВАЊЕ ОПТИМАЛНОГ УПРАВЉАЊА СИСТЕМОМ ПАЉЕЊА ОТО-МОТОРА ПРИМЕНОМ ВЕШТАЧКИХ НЕУРОНСКИХ МРЕЖА” изложена је на 202 стране и садржи 181 једначину, 90 слика и дијаграмских приказа, 18 табела и 208 коришћених референтних литературних извора. Докторску дисертацију чине следећих девет поглавља и списак литературе:

1. Увод
2. Оптималан радни циклус мотора
3. Извори показатеља сагоревања
4. Вештачка интелигенција у моторима СУС
5. Мерна инсталација
6. Обрада и припрема података
7. Динамика коленастог вратила
8. Модел виртуелног сензора *MFB50*
9. Закључак и смернице за будући рад
10. Литература

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу текста докторске дисертације дат је увод у актуелну проблематику економичности и штетне емисије мотора СУС. Назначени су трендови даљег развоја, који за циљ имају побољшање карактеристика мотора са посебним освртом на нове стратегије управљања мотором у затвореној петљи. Истакнут је значај повратних информација о процесу сагоревања у процесу управљања мотором, као и метода за екстракцију ових информација, заснованих на мерењима величина стања радног процеса мотора. Анализиране су предности и мане непосредног приступа информацијама о процесу сагоревања мерењем притиска у цилиндру, са једне, и посредног приступа, односно концепта виртуелног сензора, са друге стране. Тренутна угаона брзина коленастог вратила мотора је издвојена као основни сигнал, који богатим информационим садржајем о процесу сагоревања и доступношћу испуњава све предуслове за грађење виртуелног сензора показатеља сагоревања.

У другом поглављу се разматрају фактори, који утичу на степен корисности мотора и то, нарочито они на које се може активно утицати током рада мотора. Ослањајући се на ексергијску анализу радног процеса, дато је објашњење термодинамичких критеријума оптималног радног циклуса, са аспекта фазе процеса сагоревања. Објашњено је на који начин неоптимизовано фазно позиционирање процеса сагоревања утиче на раст неповратног пораста ентропије, током процеса, а самим тим и на смањење укупног степена корисности. Анализна је веза између фазирања процеса сагоревања и промене интензитета топлотних губитака, те је на тај начин пружено објашњење зашто се у пракси тежи ка томе да се процес сагоревања фазира тако да 50% укупно ослобођене топлоте, током процеса, буде досегнуто у угаоном интервалу од 8° до 10° коленастог вратила, после СМТ. Извршена је критичка анализа више различитих показатеља сагоревања, који за основни циљ имају праћење фазе процеса сагоревања. У оквиру овог поглавља су дате и дефиниције често коришћених показатеља сагоревања, међу којима је посебно истакнут *MFB50*, као директни индикатор угаоног положаја тренутка до кога се ослободи 50% укупно ослобођене топлоте процесом сагоревања.

Треће поглавље се бави анализом сигнала из којих се може црпети информација о показатељима сагоревања. Анализиране су предности и мане приступа мерењем притиска у цилиндру, као најнепосреднијег извора информација о процесу сагоревања. Краћи осврт је дат и на јонизационе струје, као још један директан извор, али и могућности коришћења сигнала структурно генерисаних вибрација и обртног момента на сегменту коленастог вратила, као индиректних извора информација о показатељима радног процеса у мотору. Посебно је анализирана тренутна угаона брзина, која је као сигнал, захваљујући својој доступности и, иако посредном, информационом садржају о процесу сагоревања, означена као извор великог потенцијала у модерним системима управљања мотором.

Четврто поглавље се бави анализом потенцијала вештачких неуронских мрежа у алгоритмима за управљање и дијагностику мотора СУС. Дат је основни увод у концепт вештачких неуронских мрежа и приказ и појашњење најчешће коришћених мрежа, као што су *Backpropagation* мреже или мреже засноване на радијалним активационим функцијама Гаусовог типа. Објашњен је и концепт локалних линеарних *Neurofuzzy* модела, уз демонстрацију њихове примене у реконструкцији интегралног тока ослобађања топлоте, током процеса сагоревања, на основу измереног тока притиска у цилиндру мотора, а уз примену *Lolimot* алгоритма учења. У овом поглављу је дат и преглед истраживања и постигнутих резултата у примени различитих типова вештачких неуронских мрежа у апликацијама управљања и дијагностике мотора СУС. Указано је на потенцијале које вештачке неуронске мреже имају за решавање проблема у области мотора, односно образложена је основаност идеје о примени вештачких неуронских мрежа у софтверски заснованом виртуелном сензору тока процеса сагоревања. Предложен је и представљен оригинални концепт циклусног виртуелног сензора показатеља сагоревања, заснованог на мерењу тренутне угаоне брзине, обраде овог сигнала у циљу минимизације утицаја инерцијалних момената и примене вештачке неуронске мреже за реконструкцију показатеља или чак целокупног интегралног тока ослобођене топлоте током процеса сагоревања. У закључку поглавља су наглашени предуслови, које је потребно испунити за успешну примену предложеног концепта, односно неопходност прикупљања што веће количине података, која би представљала квалитетну основу за *off-line* учење модела вештачких неуронских мрежа, као и калибрацију модела динамичког понашања склопа моторског механизма.

У петом поглављу је дат краћи опис мерне инсталације коришћене за испитивање мотора, на коме су прикупљени подаци за учење и тестирање концепта виртуелног сензора показатеља сагоревања. Коришћена мерна инсталација, заснована на комерцијално доступном аквизиционом систему, надограђена је са више оригинално развијених система за кондиционирање и мерење сигнала као што су: универзални појачивачки систем за кондиционирање сигнала са мерних мостова, терморезистивних давача и термопарова, систем за гравиметријско мерење потрошње горива и систем за кондиционирање сигнала инкременталног оптичког енкодера. За потребе мерења протока ваздуха, самостално је развијена инсталација за калибрацију протокомера по стандарду ISO5167. Описани мерни ланци су превасходно коришћени за симултано узорковање притиска у цилиндру, уписном колектору и тренутне угаоне брзине коленастог вратила. Поред тога, вршено је праћење свих најважнијих радних параметара мотора. Употреба уређаја за преграђивање усисних канала, омогућила је вршење утицаја на процес сагоревања током експеримента, што је омогућило додатно проширење скупа радних режима мотора. Прикупљање података вршено је мерењима на укупно 141 квазистационарна режима, са по 50 узастопних радних циклуса у широком подручју радног поља мотора. За потребе аквизиције података, дефинисани су оригинални алгоритми, који су имплементирани у апликације развијане у *LabVIEW*[®] програмском окружењу, уз примену оригиналног кода.

У шестом поглављу приказане су и објашњене методе коришћене за обраду експериментално прикупљених података. Велика пажња посвећена је обради индицираног притиска у цилиндру мотора, уз примену модификоване термодинамичке методе референцирања, као и идентификацији положаја спољне мртве тачке и степена сабијања применом анализе петље T-S дијаграма. С обзиром на то да тачност идентификације угаоне фазе индицираног притиска има велике последице на закључке, који произилазе из анализе овог сигнала, додатна провера идентификованог положаја спољне мртве тачке вршена је термодинамичком анализом заснованом на претпоставкама о константном интензитету преласка топлоте у уској области око спољне мртве тачке. За израчунавање релативизованог тока ослобођене топлоте, коришћена је модификована метода по Расвајлеру и Витроу (*Rassweiler & Whitrow*). За идентификацију угаоног почетка сагоревања, у оквиру ове методе, уведен је оригиналан нумерички индикатор. У оквиру потпоглавља о обради сигнала тренутне угаоне брзине коленастог вратила, развијен је оригинални метод за нумеричку компензацију измерене угаоне брзине услед радијалног бацања оптичког енкодера, чији је статор зглобном везом повезан са блоком мотора. Приказани метод је заснован на анализи кинематског модела сложеног кретања енкодера. Параметри модела идентификовани су уз претпоставку о приближно једнаком радном доприносу сваког од цилиндара вишецилиндарског мотора, који се може дефинисати критеријумом базираним на праћењу вредности синхроне покретне средине угаоне брзине коленастог вратила мотора.

У седмом поглављу докторске дисертације анализирана је динамика коленастог вратила мотора, а са циљем утврђивања везе између процеса сагоревања и тренутне угаоне брзине коленастог вратила. Детаљно су анализирани утицаји сваке од величина које, у динамичкој равнотежи, дефинишу једначину кретања коленастог вратила, као што су гасни момент, момент инерцијалних сила и моменти спољашњег оптерећења и трења. У анализи је разматран модел еквивалентан вишецилиндарском склопу линијског моторског механизма са ексцентрично постављеним клиповима у односу на осу коленастог вратила. Посебна пажња посвећена је

надogradњи модела у еквивалентан осцилаторни систем вишецилиндарског линијског клипног механизма. Параметри вишеделног модела, са еластично повезаним еквивалентним масама су идентификовани уз помоћ експериментално снимљених података и на основу техничке документације и конструисаних CAD модела. Закључено је да моделирање коленастог вратила, као осцилаторног система, може знатно допринети тачности симулиране угаоне брзине уз неминовно повећање комплексности модела. Разматрањем критеријума дефинисаних на основу вредности сопствених фреквенци осциловања, могуће је донети закључак у којој мери усложњавање модела доприноси тачности симулиране угаоне брзине одређеног сегмента коленастог вратила.

Предмет осмог поглавља је модел виртуелног сензора показатеља процеса сагоревања. Први корак, у процесирању измерене угаоне брзине, се своди на израчунавање оригинално дефинисаног, синтетичког момента, уз помоћ претходно дефинисане једначине динамичког понашања коленастог вратила, као осцилаторног система. Уведени синтетички момент својим називом упућује на парадигму величине у којој је сублимирана информација о процесу сагоревања, уз максималну супремацију непожељног утицаја инерцијалног момента. Овако дефинисан синтетички момент, поред средње вредности угаоне брзине и средње вредности притиска у усисном колектору, представља главну компоненту улаза неуронске мреже, која чини основу виртуелног сензора показатеља процеса сагоревања. Изабрана су и упоређена два концепта неуронских мрежа: један, заснован на радијалним активационим функцијама Гаусовог типа и други, заснован на локалним линеарним *neuro-fuzzy* моделима. За учење модела, заснованог на радијалним активационим функцијама Гаусовог типа, коришћен је и детаљно објашњен OLS алгоритам. За учење модела, заснованог на локалним линеарним *neuro-fuzzy* моделима, коришћен је *Lolimot* алгоритам. У оба случаја је спроведен низ нумеричких тестова, који су за циљ имали одабир оптималних параметара модела. Варирањем броја неурона, односно броја локалних линеарних модела, дошло се до закључка да оба модела неуронских мрежа могу, у веома компактној форми, успешно вршити естимацију показатеља сагоревања *MFB50*. Моћ генерализације испитиваних модела неуронских мрежа тестирана је варирањем релативног односа величина скупа података за учење мреже и скупа података за њено тестирање. Демонстрирана је добра способност генерализације оба модела, коришћењем свега 30% расположивих података за учење. Имплементирањем постулата опште заједничке информације, спроведен је поступак редукције величине улазног вектора модела неуронских мрежа, што је допринело додатном смањењу модела неуронских мрежа. Констатовано је да је тачност естимације показатеља сагоревања *MFB50* у довољно уским границама, које би омогућиле примену овако конципираног виртуелног сензора у системима паљења ото-мотора са затвореном петљом.

У деветом поглављу (*Закључак*) изведени су најважнији закључци и приказано сагледавање даљих могућности истраживања. Дата је рекапитулација извршених експерименталних и теоријских истраживања. Критичким освртом истакнути су радни режими мотора у којима, због низа оправданих разлога, управљање системом паљења у затворној петљи, нема преимућства и не може бити коришћено. Указано је на поља могуће даље примене развијеног концепта естиматора показатеља сагоревања, као и могућности његовог даљег усавршавања.

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 Ненад Миљића, дипл.инж.маш., под називом „ИСТРАЖИВАЊЕ ОПТИМАЛНОГ УПРАВЉАЊА СИСТЕМОМ ПАЉЕЊА ОТО-МОТОРА ПРИМЕНОМ ВЕШТАЧКИХ НЕУРОНСКИХ МРЕЖА” представља оригиналан и савремен приступ, уз значајан научни допринос разматраном проблему естимације показатеља сагоревања из једног посредног извора информација, каква је тренутна угаона брзина коленастог вратила. Оригиналност се огледа у концепту предложене методе естимације, која се заснива на комбинацији два модела: аналитичког, помоћу кога се врши естимација ново уведене величине, под именом синтетички момент, и модела заснованог на систему неуронских мрежа који, на основу претходно дефинисане величине, врши естимацију показатеља сагоревања *MFB50*. Оригиналност ове докторске дисертације се огледа и у приступу којим се из сигнала тренутне угаоне брзине врши директна естимација показатеља сагоревања, без међукорака који подразумева реконструкцију тока притиска у цилиндру, што је уобичајен метод забележен у анализираној и расположивој литератури. 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

хардверске компоненте и читави мерни ланци, који су коришћени током испитивања предметног мотора. Ова докторска дисертација представља јединствени подухват у примени неуронских мрежа у моторима СУС, на српском језику, што је свакако значајно на националном нивоу, а остварени резултати, који иду у корак са истраживањима на овом пољу, чине ову докторску дисертацију значајном за научно-стручну јавност и у Србији и у иностранству.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У докторској дисертацији је коришћена обимна савремена и релевантна литература из области теорије радног процеса, динамике, управљања и дијагностике мотора као и литература из области теорије и примене вештачких неуронских мрежа и теорије информација. 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 вештачких неуронских мрежа у области управљања мотором у реалном времену. Критичка анализа постојећих метода за естимацију показатеља сагоревања заслужна је и за увођење оригиналне методе приказане 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. Анализа примењених научних метода и њихова адекватност за спроведено истраживање

За реализацију постављеног циља истраживања, тј. креирања модела виртуелног сензора показатеља сагоревања, коришћено је више различитих научно-истраживачких метода. Применом метода аналитичког приступа креиран је модел клипног механизма мотора, као сложеног осцилаторног система, који је са великом тачношћу успоставио везе између побуде – гасне силе и тока тренутне угаоне брзине коленастог вратила. Модел, калибрисан коришћењем метода оптимизације, употребљен је за генерисање нове, синтетичке величине, која максимално екстрахује информацију о радном процесу унутар цилиндра само на основу измереног тока тренутне угаоне брзине коленастог вратила, при чему су интензивно коришћене нумеричке методе за решавање и симулацију модела. Сложене и вишеструке нелинеарне везе, које постоје између термодинамичких процеса унутар цилиндра и динамике кретања моторског механизма су успешно моделиране применом вештачких неуронских мрежа. Примењени системи неуронских мрежа демонстрирали су способност интуитивног препознавања комплексних веза и задовољавајућу директну естимацију показатеља сагоревања *MFB50*. У циљу повећања компактности модела неуронских мрежа, примењене су методе засноване на постулатима теорије информација. Метод, који се ослања на екстракцију опште заједничке информације улаза и излаза модела неуронских мрежа, успешно је примењен за компримовање информационог садржаја улаза и смањење његове величине, а последично и умањење модела неуронске мреже уз задржавање перформанси. Током експерименталних истраживања и прикупљања података са предметног мотора, на пробном столу, интензивно су коришћене најсавременије методе у мерењима, аквизицији и обради сигнала, као и поступцима калибрације мерних ланаца. У обради индицираног притиска у цилиндру мотора коришћен је широк спектар метода заснованих на термодинамичкој анализи, док је за обраду измереног тока тренутне угаоне брзине и компензацију грешака мерења развијена оригинална метода заснована на комбинацији кинематске анализе, анализе енергетског доприноса по цилиндру вишецилиндарског мотора и техникама оптимизације.

3.4. Оцена примењивости и верификације остварених резултата

Закључке истраживања и остварене резултате у овој докторској дисертацији, могуће је применити у пракси на више сегмената мотористике. С обзиром на то да је предложени модел виртуелног сензора показатеља сагоревања у стању да са довољном тачношћу врши естимацију величине *MFB50*, он се може користити као основни извор повратних информација у затвореном систему аутоматског управљања фазом процеса сагоревања, односно конкретно систему паљења ото-мотора. Компактна форма и брзина извршавања коришћених модела вештачких неуронских мрежа, посебно оних заснованих на локалним линеарним *neuro-fuzzy* моделима, погодни су за имплементацију у *real-time* управљачке системе базиране на уобичајено коришћеним микроконтролерским платформама. Закључено је да директан допринос концепта затвореног, у односу на отворен систем управљања у побољшању економичности није превише значајан, али да су

посредне предности изразите и да се оне огледају у уштедама, које је могуће остварити у процесу производње модерних мотора, као и у погледу побољшања квалитета издувне емисије и општих експлоатационих карактеристика мотора. Поједини резултати се могу директно применити у унапређењу постојећих метода мерења угаоне брзине сегмената коленастог вратила мотора. Сви резултати су верификовани 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 ОПТИМАЛНОГ УПРАВЉАЊА СИСТЕМОМ ПАЉЕЊА ОТО-МОТОРА ПРИМЕНОМ ВЕШТАЧКИХ НЕУРОНСКИХ МРЕЖА”, огледа се у следећем:

- Извршена је интеграција аналитичког модела динамичког понашања коленастог вратила као торзионо осцилаторног система са моделом вештачких неуронских мрежа, у циљу креирања виртуелног сензора показатеља сагоревања *MFB50*, на основу тренутне угаоне брзине вратила мерене у реалном времену;
- Постављен је, и помоћу експериментално снимљених података калибрисан, детаљан модел клипног механизма вишецилиндарског линијског мотора у виду еквивалентног торзионо осцилаторног система;
- Предложена је нова величина, тзв. синтетички момент, чијим се израчунавањем екстрахује највећи део информације о процесу сагоревања из сигнала тренутне угаоне брзине, уз истовремено максимално умањење утицаја инерцијалних сила;
- Уведена је нова метода за компензацију грешака у мерењу угаоне брзине сегмената коленастог вратила, заснована на праћењу неравномерности енергетског доприноса по цилиндрима вишецилиндарског мотора;
- Предложено је коришћење концепта опште заједничке информације у циљу смањења величине улазног вектора вештачке неуронске мреже и добијања нумерички компактнoг виртуелног сензора показатеља сагоревања *MFB50*, прилагођеног имплементацији у затворени систем управљања паљењем ото-мотора у реалном времену;
- Развијене су оригиналне компоненте мерних ланаца за испитивање мотора на пробном столу за моторе, као и унапређене методе обраде мерних сигнала;
- Потврђена је задовољавајућа тачност виртуелног сензора показатеља *MFB50* на великом скупу експериментално прикупљених података;

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Основни циљ истраживања, везан за формирање нумеричког модела, који врши довољно тачну директну естимацију показатеља сагоревања на основу измерене брзине, је остварен у обиму који демонстрира комплетну могућност примењене методологије за оваква истраживања. Конципирани виртуелни сензор показатеља *MFB50*, довољне је тачности да се може употребити као извор повратне информације о процесу сагоревања у систему паљења мотора. Истраживање је било ограничено на естимацију показатеља сагоревања само код квазистационарних радних режима мотора, што оставља велики простор за даљи рад и развој модела естиматора, који би успешно могао да буде примењен и током динамичких промена режима мотора. Истраживање и резултати, приказани у оквиру ове докторске дисертације, засновани су на мерењима угаоне брзине мерним ланцем, чија је угаона резолуција вишеструко већа од резолуције мерних ланаца који су уобичајено расположиви на моторима масовне производње. Истраживање, које би се фокусирало на утицај и везе угаоне резолуције мерене угаоне брзине на перформансе предложеног естиматора, би додатно приближиле цео предложени концепт реалним управљачким апликацијама мотора. Превазилажење ограничења предметног мотора, на коме су прикупљани експериментални подаци, би омогућио

проширење поља режима на којима би предложени концепт могао бити додатно проверен. Све ово отвара додатне могућности за истраживање у овој области и добијање још квалитетнијих резултата.

4.3. Очекивана примена резултата у пракси

Резултате истраживања могуће је применити у затвореном систему управљања паљењем ото-мотора, у коме је могуће остварити оптимално позиционирање фазе процеса сагоревања унутар радног процеса мотора. Овај приступ, захваљујући повратној информацији о процесу сагоревања, пружа предуслове за формирање оптималног управљања углом претпаљења. Овакво управљање системом паљења доприноси побољшању перформанси мотора по разним критеријумима, али пружа простор и за реорганизацију и уштеду у процесу производње мотора, с обзиром на то да овај концепт омогућава замену или одбацивање неких од уобичајено коришћених мерних ланаца на мотору. Резултати, који се односе на развијене и унапређене методе за обраду сигнала, као и развијене компоненте мерних система, остају у функцији реализације низа даљих истраживачких пројеката.

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] Miljić, N. & Tomić, M., A Neuro-Fuzzy Based Combustion Sensor for the Control of Optimal Engine Combustion Efficiency, Thermal Science (ISSN 0354-9836), OnLine-First (00):160-160, 2012. DOI:10.2298/TSCI120703160M
<http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0354-9836/2012%20OnLine-First/0354-98361200160M.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.

M53 Рад у научном часопису

- [3] Томић, М., Петровић, С., Поповић, С., Миљкић, 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

M33 Саопштења са међународних скупова штампана у целини

- [4] 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.
- [5] 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.

- [6] Томић, М., Поповић, С., Милјић, 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.
- [7] Томић, М., Петровић, С., Поповић, С., Милјић, 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.
- [8] Miljić, N., *Mathematical model of a variable speed governor for distributor injection pump*, Proceedings of the International Congress Motor Vehicles & Motors 2008 (MVM 2008), ISBN 978-86-86663-57-3, MVM2008-050, Kragujevac, October 2008, Serbia, 2008.
- [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.
- [11] 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.
- [12] 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.

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

1. Поповић, С., Милјић, 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)
2. Петровић, М., Милјић, 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)
3. Поповић, С., Милјић, Н., **Масени протокомер за ваздух великог капацитета HCHFME-FME 5000** (мерни инструмент (M85): термални масени протокомер уз који је развијана и проширен капацитет инсталације за калибрацију протокомера по стандарду ISO5167; развијен у пројекту 6380-TP МНТР Владе Републике Србије)
4. Поповић С., Милјић Н., Цветић М., **Систем за континуирано мерење масеног протока горива FCMS-3000** (мерни инструмент (M85): мерни систем високе класе тачности за динамичко мерење масеног протока горива; развијен у пројекту 6380-TP МНТР Владе Републике Србије)
5. Јурковић Т., Томић М., Петровић С., Цветић М., Поповић С., Милјић Н., **Усисни систем мотора варијабилне геометрије "Dual Port"** (прототип (M85): систем за варијацију попречног пресека усисних канала четвороцилиндарског мотора; развијен у пројекту 14074-TP МНТР Владе Републике Србије)

5. Закључак и предлог

Докторска дисертација под називом „ИСТРАЖИВАЊЕ ОПТИМАЛНОГ УПРАВЉАЊА СИСТЕМОМ ПАЉЕЊА ОТО-МОТОРА ПРИМЕНОМ ВЕШТАЧКИХ НЕУРОНСКИХ МРЕЖА“ кандидата Мр Ненада Миљкића, дипл.инж.маш., представља савремен и оригиналан научни допринос, који уз анализу разматраних проблема и кроз свеобухватно сагледавање проблематике моделирања коришћењем аналитичких модела и вештачких неуронских мрежа у домену естимације термодинамичких показатеља радног процеса мотора, пружа квалитетну основу за развој савремених система управљања системом паљења ото-мотора.

На основу онога што је приказано у докторској дисертацији и чињенице да је анализирана проблематика веома актуелна у научној јавности, констатује се да је кандидат Мр Ненад Миљкић, 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 Ненада Миљкића, дипл.инж.маш.

са темом

Истраживање оптималног управљања системом паљења ото-мотора применом вештачких неуронских мрежа

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 да је у складу са 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, 03.10.2012. године

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

Др Зоран Миљковић, редовни професор,
Машински факултет у Београду

Др Зоран Јовановић, научни саветник
ИНН Винча

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број: 958/6
Датум: 11.10.2012. године
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 11.10.2012. године, донело је

ОДЛУКУ

I Прихвата се извештај о позитивној оцени урађене докторске дисертације коју је поднео мр НЕНАД МИЉИЋ и одобрава јавна одбрана дисертације по добијању сагласности од Универзитета, под насловом: „ИСТРАЖИВАЊЕ ОПТИМАЛНОГ УПРАВЉАЊА СИСТЕМОМ ПАЉЕЊА ОТО-МОТОРА ПРИМЕНОМ ВЕШТАЧКИХ НЕУРОНСКИХ МРЕЖА“

II Универзитет је дана 13.03.2009. године, својим актом број 612-25/26/09 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата.

III Радови кандидата у часопису међународног значаја:

[1] Miljić, N. & Tomić, M., A Neuro-Fuzzy Based Combustion Sensor for the Control of Optimal Engine Combustion Efficiency, Thermal Science (ISSN 0354-9836), OnLine-First (00):160-160, 2012. DOI:10.2298/TSCI120703160M
<http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0354-9836/2012%20OnLine-First/0354-98361200160M.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