

Факултет МАШИНСКИ

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

1466/6
(Број захтева)

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

05.09.2013. године
(Датум)

З А Х Т Е В
за давање сагласности на предлог теме докторске дисертације

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

ИДЕНТИФИКАЦИЈА ПАРАМЕТАРА ЕКВИВАЛЕНТНОГ ДИНАМИЧКО-ТОРЗИОНОГ СИСТЕМА КОЛЕНАСТОГ ВРАТИЛА ДИЗЕЛ МОТОРА НА ОСНОВУ ПРОМЕНЉИВОГ ТОКА УГАОНЕ БРЗИНЕ

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ Мотори

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

1. Име, име једног родитеља и презиме кандидата: ЖЕЉКО (Мираш) БУПАТОВИЋ
2. Назив и седиште Факултета на коме је стекао високо образовање: Машински факултет Београд
3. Година дипломирања: 1991.
4. Назив магистарске тезе кандидата: Могућности дијагностике радног процеса мотора на основу анализе промене угаоне брзине коленастог вратила
5. Назив Факултета на коме је магистарска теза одбрањена: Машински факултет Београд
6. Година одбране магистарске тезе: 2008.
7. Назив Факултета на коме је кандидат завршио докторске студије: _____ /
- Одсек, смер или група: _____ /
- Година завршетка докторских студија: _____ /

Обавештавамо Вас да је _____
(назив надлежног тела Факултета)

на седници одржanoј 05.09.2013.
размотрило предложену тему и закључило да је тема подобна за израду докторске дисертације.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић

Прилог:

1. Предлог теме докторске disertacije sa obrazloženjem.
2. Akt nadležnog tela fakulteta o podobnosti teme za izradu doktorске disertacije.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
Број: 1466/5
Датум: 05.09.2013. године
Београд, Краљице Марије 16

На захтев мр Жељка Булатовића, дипл.инж.маш., бр. 1466/1 од 18.07.2013. године, извештаја Комисије у саставу: проф.др Мирољуб Томић, проф.др Милорад Милованчевић, проф.др Александар Обрадовић, проф.др Александар Милашиновић, Универзитет у Бања Луци, Машински факултет, Република Српска и доц.др Ненад Миљић, бр. 1466/4 од 05.09.2013. године, а на основу чл. 128. Закона о високом образовању, Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду на седници од 05.09.2013. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Прихвата се предлог о испуњености услова и о научној заснованости теме докторске дисертације **«ИДЕНТИФИКАЦИЈА ПАРАМЕТАРА ЕКВИВАЛЕНТНОГ ДИНАМИЧКО-ТОРЗИОНОГ СИСТЕМА КОЛЕНАСТОГ ВРАТИЛА ДИЗЕЛ МОТОРА НА ОСНОВУ ПРОМЕНЉИВОГ ТОКА УГАОНЕ БРЗИНЕ»** докторанта **МР ЖЕЉКА БУЛАТОВИЋА**, дипл.инж.маш.

За ментора докторанту **Мр Жељку Булатовићу**, именује се **проф.др Мирољуб Томић**.

Одлуку доставити: Већу Научних области техничких наука Универзитета у Београду на сагласност, ментору и архиви.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић

**НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ**

Предмет: Извештај Комисије о подобности теме и кандидата **мр Жељка М. Булатовића, дипл. инж. маш.** за израду докторске дисертације

На основу одлуке Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду бр. 1466/3 од 05.09.2013. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену испуњености услова и научне заснованости теме докторске дисертације кандидата **мр Жељка М. Булатовића, дипломираног инжењера машинства**. После проучавања достављеног материјала подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

**о прихватању теме
докторске дисертације под насловом**

**ИДЕНТИФИКАЦИЈА ПАРАМЕТАРА ЕКВИВАЛЕНТНОГ
ДИНАМИЧКО - ТОРЗИОНОГ СИСТЕМА КОЛЕНАСТОГ ВРАТИЛА ДИЗЕЛ
МОТОРА НА ОСНОВУ ПРОМЕНЉИВОГ ТОКА УГАОНЕ БРЗИНЕ**

1. ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

1.1.1 Општи биографски подаци

Мр Жељко М. Булатовић је рођен 18. септембра. 1964. године у Пљевљима (Република Црна Гора). Основну и средњу школу (математички смер) је завршио у Пљевљима са одличним успехом. Војни рок је одслужио 1984. године. Исте године уписао је Машински факултет Универзитета у Београду. Дипломирао је 1991. године на предмету Теорија мотора (ментор проф. др Стојан Петровић) са темом “Актуелно стање издувне емисије путничких и комерцијалних возила са ото и дизел моторима”.

Јуна 1992. године кандидат се запослио као инжењер приправник у Двадесет првом мају у Раковици (ДМБ), као њихов дугогодишњи стипендиста, где је обављао инжењерске послове у Бироу за стандардизацију.

Јануара 2000. године прелази у Војнотехнички институт, у тадашњи Сектор за борбена и неборбена возила. У новој фирми је од самог почетка био ангажован на бројним истраживачким и развојним задацима везаним за усавршавање мотора великих снага, специјалне немене, серије В46. У својој инжењерској пракси се бавио разнородним делатностима, од конструисања, до активног учешћа у свим фазама испитивања мотора и њихових подсистема. Аутор је бројних стручних извештаја са испитивања, заведених у Техничкој архиви Војнотехничког института. Последњих година се специјализовао за

проблематику мерења и истраживања радних процеса, како на моторима тако и на њиховим виталним подсистемима. Посебно се посветио истраживању променљивог тока угаоне брзине и проучавању проблематике торзионих осцилација коленастог вратила мотора. У Војнотехничком институту ради и данас.

Магистарске студије завршио је 22.01.2008. године одбраном тезе “Могућности дијагностике радног процеса мотора на основу анализе промене угаоне брзине коленастог вратила”, под менторством проф. др Мирољуба Томића. Априла 2011 године му је додељено научно-истраживачко звање – истраживач сарадник. Кандидат се у раду користи руским и донекле енглеским језиком. Аутор је већег броја научних и стручних радова који су саопштавани на научним скуповима или објављени у домаћим часописима и страним часописима са високим научним рејтингом.

Посебно треба истаћи да је кандидат мр Жељко М. Булатовић своју оријентацију ка научно-истраживачком раду потврдио тиме што је као први аутор објавио три стручна рада у међународним часописима са SCi листе.

1.2 Списак објављених радова

Као аутор или коаутор кандидат је објавио више радова из области дијагностике, проучавања радних процеса, математичког моделирања, издувне емисије и сагоревања код дизел и ото мотора и то:

1.2.1 Магистарска теза (M73=3)

Булатовић Ж., “Могућности дијагностике радног процеса мотора на основу анализе промене угаоне брзине коленастог вратила”, магистарски рад, ментор проф. др Мирољуб Томић, Машински факултет у Београду, 2008.

1.2.2. Научни радови у часописима националног значаја са рецензијом (M63=0,5)

1.2.2.1 Драган Кнежевић, Стојан Петровић, Жељко Булатовић, Могућност побољшања издувне емисије тракторског дизел мотора домаће производње применом система рецикулације издувних гасова (EGR), Научно-стручни часопис, ипрр, Истраживања и пројектовања за привреду, година V, број 17, 2007, стр. 25-33, ISSN 1451-4117, UDC 33, Београд

1.2.2.2 Жељко Булатовић, Драган Кнежевић, Тренутна угаона брзина као дијагностички и контролни параметар рада мотора, Научно-стручни часопис, ипрр, Истраживања и пројектовања за привреду, година IV, број 14, 2006, стр. 49-53, ISSN 1451 – 4117, UDC 33, Београд.

1.2.3.3 Булатовић Ж., Математичко моделирање и анализа угаоне брзине коленастог вратила дванаестоцилиндричног мотора, Трећи научно-стручни скуп са међународним учешћем из области одбрамбених технологија, OTEX 2009, ISSN 978-86-81123-40-9, UDC 623.746-519, Београд.

1.2.3.4 Бојер Љ., Булатовић Ж., Радић Д., Проблеми који настају употребом безоловног бензина код мотора конструисаних за рад са оловним бензином, Трећи научно-стручни скуп са међународним учешћем из области одбрамбених технологија, OTEX 2009, ISSN 978-86-81123-40-9, UDC 623.746-519, Београд.

1.2.3.5 Радић Д. Бојер Љ., Булатовић Ж., Дамјанов Р., Експериментално одређивање стационарних карактеристика радног поља центрифугалног компресора намењеног натпуњењу мотора СУС, Трећи научно-стручни скуп са међународним учешћем из области одбрамбених технологија, OTEX 2009, ISSN 978-86-81123-40-9, UDC 623.746-519, Београд.

1.2.3. Научни радови у часописима међународног значаја са рецензијом (SCi листа)

(M21=8)

1.2.3.1. Ž.M. Bulatović, M.S. Štavljanin, M.V. Tomić, D.M. Knežević, S.LJ. Biočanin, Measurement and analysis of angular velocity variations of twelve-cylinder diesel engine crankshaft, Mechanical Systems and Signal Processing 25 (2011) 3043–3061, DOI: 10.1016/j.ymssp.2011.05.002, 2011

(M23=3)

1.2.3.2 Željko. M. Bulatović, Miroljub. V. Tomić, Dragan. M. Knežević, Milos. R. Cvetić, Evaluation of Variable Mass Moment of Inertia of Internal Combustion Engine Piston-Crank Mechanism, Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part D - Journal of Automobile Engineering, Volume 225, Issue 5, May 2011, p.p. 687 – 702, ISSN 0954-4070, DOI: 10.1177/2041299110394918.

(M23=3)

1.2.3.3 Željko. M. Bulatović, Slavko N. Rakić, Dragan. M. Knežević, Miroljub. V. Tomić, Ljubiša M. Bojer, Dragoslav B. Radić, Goran L. Jerkin, Research Of The Combustion Process Of Spark-Ignition Engines Of The Older Generation In The Conditions Of Transition From Leaded Petrol MB 86 To The Unleaded Petrol BMB 95, Thermal Science, 2013 On Line-First (00): 55-55, ISSN 0354-9836, DOI: 10.2298/TSCI 120916055B

1.2.4 Радови саопштени на скупу међународног значаја, штампани у целини са рецензијом (M33=1)

1.2.4.1 Драган Кнежевић, Мирољуб Томић, Стојан Петровић, Жељко Булатовић, Влада Стајић, Петар Колендић, Утицај рецикулације издувних гасова на квалитет издувне емисије дизел мотора, Међународна конференција DEMI 2009, ISBN 978-99938-39-23-1, Зборник радова, стр. 625-630, Бања Лука, 2009.

1.3 Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Узимајући у обзир досадашње радно искуство, објављене научне и стручне радове и одбрањену магистарску тезу, може се закључити да мр Жељко М. Булатовић има способност за самостални научно-истраживачки рад, да је стручно и научно орјентисан ка проблематици међузависности радних процеса у цилиндрима, торзионих осцилација и променљивог тока угаоне брзине коленастог вратила мотора, као и способност за организацију експерименталног научног рада. Предложена тема докторске дисертације надовезује се на његово претходно искуство и одговара предмету његовог интересовања, па се може очекивати успешна реализација дисертације у наредном периоду.

2. ПРЕДМЕТ И ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

2.1 Приказ предмета истраживања и хипотетичких ставова о проблему који се истражује

Предмет дисертације је истраживање динамичког понашања коленастог вратила мотора са унутрашњим сагоревањем, са посебним акцентом на његове торзионе осцилације. Примарни циљ дисертације је да се на бази упоредног експерименталног испитивања и математичког моделирања променљивог тока угаоне брзине коленастог вратила реалног мотора, као сложеног динамичког и торзионог система, идентификују параметри тог математичког модела. Математички модел ће се базирати на развијеном еквивалентном динамичком систему који ће послужити и за проучавање торзионих осцилација, па отуда термин "еквивалентни динамичко–торзиони систем". Треба истаћи да је неке од параметара тог система, као што су пригушења, немогуће експериментално одредити директним методама мерења. То се посебно односи на унутрашње пригушење (пригушење у материјалу) коленастог вратила. С друге стране, нису егзактно познате ни торзионе крутости, мада данас постоје методе да се оне приближно процене и без експерименталних испитивања.

Предметна истраживања су значајна и актуелна на данашњем степену развоја мотора са унутрашњим сагоревањем из два разлога:

- 1) Торзионе осцилације су најугрожавнији фактор при конструисању коленастог вратила. Кривајни механизам мотора са унутрашњим сагоревањем, са посебним нагласком на коленасто вратило мотора, требало би да задовољи функционалне услове уз минималну тежину и оптималну крутост. Тачност прорачуна везаних за проблем торзионих осцилација коленастог вратила мотора, директно зависи од степена тачности којом су процењени параметри усвојеног тзв. еквивалентног торзионог система.
- 2) Савремена дијагностика мотора са унутрашњим сагоревањем, базирана је на кориштењу тзв. безконтактних метода мерења тренутне угаоне брзине замајца или неког другог дела на коленастом вратилу приступачном за мерење. Посебан изазов на овом пољу представљају мотори великих снага и габарита који представљају изразито торзионо-еластичне системе. Математички модели који описују понашање ових система су по правилу јако компликовани, са великим бројем степени слободе, ограниченим могућностима упрошћавања и неизбежно су базирани на системима нелинеарних диференцијалних једначина.

Ова дисертација ће се базирати на мотору који има низ нетипичних конструктивних решења, а која се директно одражавају на усложњавање математичког модела и одзив система. Ради се о турбопрехрањиваном дванаесто-цилиндарском дизел мотору ознаке В46-ТК1А са директним убризгавањем горива, V градње са углом од 60° између цилиндара леве и десне стране мотора. Овај мотор је по многим својим особинама специфичан, али са становишта предложене докторске тезе важно је истаћи следеће:

- Мотор поседује сложени клипни механизам кога чине масивна главна клипњача и знатно мања бочна клипњача. Бочна клипњача није директно повезана са коленастим вратилом, већ је преко осовинице спојена са ушицом на великој песници главне клипњаче. Оваква решења клипног механизма су изузетно ретка, па су и публиковани стручни радови који се баве њиховом кинематиком и динамиком прави раритет.
- Мотор због ограничавајућег уградбеног простора не поседује замајцац, што се директно одражава на повећан ниво амплитуда варијација угаоне брзине његовог коленастог вратила.

Биће набројано и још неколико основних карактеристика мотора, како би се стекао бољи увид о каквом објекту испитивања се ради:

- Максимална ефективна снага мотора је 882 kW при 2000 min^{-1} .
- Максимални обртни момент износи 5000 Nm у опсегу од 1300 до 1400 min^{-1} .
- Укупна радна запремина $38,88 \text{ dm}^3$.
- Пречник клипа 150 mm .
- Ход клипа 180 mm .
- Дужина главне клипњаче 320 mm .

У овом раду ће најпре бити приказан поступак посредног одређивања непознатих или оријентационо познатих параметара математичког модела кретања коленастог вратила описаног мотора. У ту сврху биће примењене методе идентификације, користећи експериментална испитивања променљивог тока угаоне брзине коленастог вратила. При решавању ће бити коришћене *Levenberg-Marquardt* методе за оптимизацију функције циља. Парцијалне деривације матрица неопходних за процес оптимизације биће добијене на основу анализе осетљивости система. Осетљивост система који у математичком смислу представља крут, тзв. "*stiff differential equation*" систем, утврдиће се током његовог решавања, директним диференцирањем једначина модела. На основу овако процењених параметара и усвојеног торзионог система коленастог вратила мотора еквивалентног реалном, биће извршен прорачун критичних бројева обртаја, максималних амплитуда осциловања и напрезања са аспекта торзионих осцилација. Овај прорачун ће имати и практичан значај, пошто је мотор на коме су вршени експерименти развијен до нивоа прототипа, и такви прорачуни за њега до сада нису вршени.

Дакле, основни хипотетички став на којој је базирана предложена дисертација је да реалне информације о пригушеним торзионим осцилацијама испитиваног система и њиховим побудама (моментима), морају бити садржане у променљивом току угаоне брзине коленастог вратила. Ова чињеница оставља могућност да се те информације искористе у приближавању пројектованих еквивалентних математичких модела реалним стањима динамичког понашања испитиваних система.

2.2 Осврт на релевантне библиографске изворе

Постоје бројни радови у којима се анализира тренутна угаона брзина коленастог вратила мотора, углавном у сврхе дијагностике регуларности одвијања радних процеса који се одвијају у цилиндрима тих мотора. Ова тема је посебно постала актуелна крајем прошлог века и интересовање за њу је у експоненцијалном порасту. Огромна већина тих радова се односи на моторе са мањим бројема цилиндара, нижих или средњих нивоа снага и уобичајених габарита, чија коленаста вратила се, у динамичком смислу, у великој мери понашају као крута тела. Тек њиховим форсирањем по броју обртаја и оптерећењу, када долази до значајног раста побудног момента као збира гасних и инерцијалних сила које делују на коленасто вратило, угаона брзина поприма сасвим неочекиван ток под утицајем повећаног нивоа еластичних, торзионих деформација. Због релативно мањег броја цилиндара мањи је и број степени слободе, па је и мањи број диференцијалних једначина еквивалентних математичких модела, те је њихово решавање једноставније.

С друге стране, може се наћи врло мали број јавно објављених радова и истраживања који се односе на моторе који по броју цилиндара, својим габаритима и номиналној снази, излазе из уобичајених оквира. У том смислу, прави изузетак представља рад који су презентирали *M. Desbazeille, R. B. Randall, F. Guillet, M. El Badaoui* и *C. Hoisnard* под

вазивом *"Model-based diagnosis of large diesel engines based on angular speed variations of the crankshaft"*. Објекат њиховог испитивања је велики, снажни (4 MW при 1500 min⁻¹), двадесето – цилиндарски дизел мотор (произвођач Warstila), намењен кризним ситуацијама у нуклеарним електранама. Остварени резултати ових истраживача упућују на закључак да истраживања променљивог тока угаоне брзине коленастих вратила великих, снажних мотора не представља слепу улицу, већ прави пут који може дати бројне корисне информације.

Корисна искуства у процесу математичког моделирања променљивог тока угаоне брзине коленастог вратила садржана су и у радовима истраживача са наших простора. У том смислу морају се поменути докторске дисертације *Н. Л. Миљина: "Истраживање оптималног управљања системом паљења ото-мотора применом вештачких неуронских мрежа"* и *С. Ј. Поповића: "Истраживање и развој метода за анализу радног процеса мотора на основу мерења тренутне угаоне брзине коленастог вратила"*.

На променљивом току угаоне брзине коленастог вратила базира се и докторска дисертација *А. Милашиновића: "Математико моделовање и експериментално испитивање нелинеарних торзионих осцилација коленастог вратила мотора сус"*. Тај рад је послужио као најзначајнији релевантни извор при изради ове докторске дисертације.

2.3 Научни циљеви рада

Техничка дијагностика данас представља озбиљну и незаобилазну дисциплину у сфери експлоатације мотора са унутрашњим сагоревањем. Крајем осамдесетих година прошлог века у САД су настали први прописи који третирају ову проблематику. Ти прописи су се временом проширивали и усложњавали, да би коначну форму добили у облику који је данас познат као OBD (скраћеница од *On Board Diagnostics*). OBD је већ прерастао у стандард и законску обавезу које се придржавају сви водећи произвођачи мотора у свету. Тренутна угаона брзина коленастог вратила мотора се према одредбама свих фаза у развоју OBD, дакле већ више од 25 година, користи као параметар за техничку дијагностику изостанка процеса сагоревања у неком од цилиндара код мотора уграђених у комерцијална возила. То је постало могуће захваљујући бурној експанзији у области електронификације, тј. примени електронских компоненти који управљају и надгледају рад мотора. Ипак, и у овој класи мотора постоји проблем ако је број цилиндара већи од шест цилиндара, где се захтев за детектовањем појаве изостанка процеса сагоревања под условима свих бројева обртаја и вредностима оптерећења, не може у потпуности испунити.

С друге стране, код мотора већих габарита је изражен проблем нижих вредности торзионих крутости, пошто је торзиона крутост обрнуто пропорциона дужини коленастог вратила. Овај фактор пресудно утиче да ток угаоне брзине коленастог вратила ових мотора значајно одступа од прорачуна где се торзионе осцилације у систему занемарују. Међутим, све анализе и досадашњи резултати испитивања говоре да узимањем у обзир већине фактора који доводе до описане појаве, тренутна угаона брзина коленастог вратила и у овом случају садржи велики број информација о раду мотора као целине, а такође и о радним процесима који се одигравају унутар појединих цилиндара.

Примарни научни циљ у оквиру ове докторске тезе је да се на бази експерименталних мерења и упоредо развијеног математичког модела тока угаоне брзине коленастог вратила прошире теоретска и практична сазнања о динамичком понашању коленастог

вратила мотора који по броју цилиндара, габаритима и перформансама одступају од уобичајених конструкција. Показаће се да повишен ниво торзионих осцилација код оваквих мотора оставља могућност одређивања сопствених фреквенци осциловања и идентификације непознатих и оријентационо познатих параметара еквивалентног торзионог (динамичког) система на основу угаоне брзине коленастог вратила.

3. ПОЛАЗНЕ ХИПОТЕЗЕ

Променљиви ток угаоне брзине коленастог вратила мотора је последица суперпонираног деловања два основна фактора, и то:

1) Променљивог обртног момента мотора у току једног радног циклуса, услед периодично променљиве укупне тангенцијалне силе моторног механизма, којој је овај момент директно сразмеран.

2) Други битан фактор на променљив ток угаоне брзине коленастог вратила су његове еластичне, пригушене торзионе деформације побуђене збирним деловањем момената који потичу од активних гасних сила, инерцијалних сила клипног механизма, сила трења, момената изазваних пригушењима у систему, момената који се са коленастог вратила одводе за покретање помоћних уређаја и момента који се одаје потрошачу.

У циљу конкретног проучавања наведених феномена и реализације предвиђеног предмета истраживања, користећи одговарајуће научне методе, претпостављају се неке основне хипотезе од којих се у овом раду полази:

- Реални систем кога чине коленато вратило мотора, склоп спојничких вратила и хидраулична кочница, замениће се еквивалентним динамичко - торзионим системом.

- Еквивалентни динамичко - торзиони систем чиниће дискови чији су моменти инерције еквивалентни моментима инерције елемената које ти дискови замењују. Сваки пар цилиндара леве и десне стране испитиваног V мотора биће представљен одговарајућим диском, при чему ће број степени слободе еквивалентног динамичког система бити већи од укупног броја парова цилиндара, којих је и овом случају шест.

- За процену момента инерције сложеног кривајног механизма кога чине две клипне групе, главна и бочна клипњача, биће развијен посебан метод којим ће се добити променљивост момента инерције у односу на угао обртања коленастог вратила.

- Дискови ће бити спојени торзионим опругама чија торзиона крутост је еквивалентна торзионој крутости делова појединих одсечака вратила.

- Моменти гасних сила ће бити моделирани на основу снимљених индикаторских притисака у по једном цилиндру леве и десне стране мотора и притиска картерских гасова.

- Моменти инерцијалних сила ће бити моделирани на основу измерених маса појединих елемената и одговарајућих кинематских једначина кретања тих маса.

- Момент трења ће бити одређен тако што ће се од момента укупних губитака одузети процењени моменти који се одводе за покретање помоћних уређаја мотора (пумпа за уље, пумпа за расхладну течност, пумпа високог притиска, разводни механизам).

- Трење ће се третирати као спољашње вискозно пригушење пропорционално угаоној брзини коленастог вратила.

4. НАУЧНЕ МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА

У експерименталном делу рада биће коришћена сертифицикована мерна опрема произвођача *National Instruments* и софтвери на бази развојног окружења *LabView-a* у чијем развоју је аутор и сам учествовао. Синхроно, у реалном времену (*real-time*) и са максималном резолуцијом од 1 MHz коју је било могуће остварити са доступном мерном опремом ће се мерити следеће величине:

- Четвртасти напонски сигнали са опто – електронског енкодера резолуције 1000 импулса по једном обрту, монтираног на слободном крају коленастог вратила. На основу ових сигнала ће се добити угаона подела коленастог вратила која ће послужити да се све измерене величине из домена времена пребаце у домен угла коленастог вратила. Ови сигнали ће такође послужити да се одреде токови тренутне угаоне брзине слободног краја коленастог вратила за све режиме при којима је мотор испитиван.
- Сигнали са сензора (који функционише на принципу *Hall*-овог ефекта) фиксираних у непосредној близини набуљеног диска монтираног на крају коленастог вратила са ког се одаје снага мотора. На основу ових сигнала добиће се токови угаоне брзине другог краја коленастог вратила за све режиме при којима је мотор испитиван.
- Токови притисака у по једном цилиндру са леве и десне стране мотора. На основу разлике ових притисака и притисака картерских гасова биће одређени моменти који потичу од гасних сила, при чему се претпоставља да су токови притисака у осталим цилиндрима леве и десне стране мотора идентични измереним, само су фазно померени по углу коленастог вратила према редоследу паљења.

Поред ових величина биће мерене и све остале величине које служе за прорачун ефективних показатеља рада мотора (средња вредност угаоне брзине коленастог вратила, обртни момент моторске кочнице, потрошња горива, атмосферски услови), притисци и температуре свих радних флуида мотора (горива, усисног ваздуха, расхладне течности, уља за подмазивање, картерских гасова и издувних гасова), итд.

Математички модел динамичког понашања коленастог вратила биће базиран на опште познатом систему нелинеарних диференцијалних једначина кретања где се коленасто вратило посматра као сложен осцилаторни систем. Као познати параметри тог система сматраће се:

- Моменти инерције појединих елемената система. За елементе који врше чисто ротационо кретање у односу на подужну осу коленастог вратила, моменти инерције ће бити одређени на бази модела солида тих елемената креираним у неком од пакета за 3Д моделирање (*Mechanical Desktop*, *Catia*).
- Моменти који потичу од гасних сила.
- Моменти који потичу од инерцијалних сила.
- Коефицијенти спољашњег пригушења који бити одређени на бази процењеног момента сила трења у систему.
- Измерена угаона брзина на два супротна краја коленастог вратила.

Као оријентационо познати параметри система сматраће се торзионе крутости појединих елемената, који ће бити процењени методом коначних елемената, док ће се потпуно непознатим параметрима система сматрати унутрашња (структурна) пригушења у материјалу коленастог вратила.

Идентификације непознатих или недовољно познатих параметара модела ће се извршити на основу опште-прихваћеног *Levenberg-Marquardt* - овог поступка за оптимизацију функције циља, при чему ће се развити математички модел инверзан постављеном моделу динамичког понашања коленастог вратила, са измереним угаоним

брзинама коленастог вратила као улазним величинама и торзионим крутостима и унутрашњим пригушањем као излазним величинама.

5. ОЧЕКИВАНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

Кључни научни допринос који се очекује од ове докторске тезе је потврда могућности коришћења измерена угаоне брзине коленастог вратила за тачнију идентификацију непознатих параметара еквивалентног торзионог система, који су се раније усвајали само оријентационо. Имајући у виду да тренутна угаона брзина коленастог вратила у себи садржи и такве информације као што су природне фреквенције торзионог осциловања самог вратила, биће могуће извршити проверу коректности њиховог приближног одређивања уобичајеним прорачунским методама (нпр. метода *Holcer* – а).

Раније је истакнута чињеница да мотор који је послужио као објекат испитивања у овој докторској дисертације не поседује класичан клипни механизам, већ сложени механизам са главном и помоћном клипњачом. Самим тим је искључена могућност директне примене било ког од раније развијених математичких модела кретања коленастог вратила који се односе на моторе са класичним клипним механизмом.

За праћење положаја коленастог вратила при његовом кретању и за израчунавање тренутних угаоних брзина биће коришћена два сензора постављена на супротним крајевима коленастог вратила:

- опто - електронски енкодер спрегнут са слободним крајем коленастог вратила, и
- давач са *Hall* – овим ефектом у спрези са назубљеним диском монтираном на крају коленастог вратила са ког се одаје снага мотора.

Овакав концепт сам по себи представља неуобичајен приступ у проучавању феномена који се односе на предмет ове дисертације. Примењена поставка сензора има низ предности и омогућава добијање нових корисних информација које се немогу добити уобичајеним поступцима испитивања где се користи само један сензор.

- За идентификацију непознатих или недовољно познатих параметара динамичког модела понашања коленастог вратила, као и за верификацију самог модела, користиће се измерене угаоне брзине и на једном и надругом крају коленастог вратила. Овим се тачност идентификованих параметара знатно повећава.

- Праћењем положаја супротних крајева коленастог мотора могу се са великом тачношћу одредити вредности разлика у амплитудама торзионог осциловања једног краја вратила у односу на други. На основу екстремних разлика ових амплитуда као последице збирног деловања свих хармоника резултујућег побудног момента, може се проценити коректност прорачуна максималних амплитуда торзионог осциловања коленастог вратила на основу усвојеног еквивалентног торзионог система.

6. ПЛАН ИСТРАЖИВАЊА И СТРУКТУРА РАДА

6.1 План предвиђених фаза и активности

План истраживања у оквиру ове докторске дисертације подразумева следеће научно истраживачке активности:

1. Детаљан опис математичког модела динамичког понашања коленастог вратила мотора.
2. Анализа свих утицајних параметара математичког модела и процена могућности његовог упрошћавања.
3. Извођење низа експеримената како би се добило довољно корисних података за идентификацију параметара и верификацију коректности математичког модела.
4. Систематизација добијених експерименталних резултата и анализа могућности њихове примене.
5. Идентификација непознатих и оријентационо познатих параметара математичког модела динамичког понашања коленастог вратила мотора.
6. Прорачун резонантних режима рада мотора, као и нивоа амплитуда и нивоа напрезања узрокованих торзионим осцилацијама коленастог вратила при овим режимима рада.
7. Дефинисање метода и критеријума по којима се тренутна угаона брзина коленастог вратила овог мотора може искористити за идентификацију регуларности одвијања радних процеса у његовим цилиндрима.

6.2 Структура рада и преглед поглавља у предложеној докторској дисертацији

Основна структура предложене докторске дисертације начелно ће обухвати следеће:

1. Уводна разматрања
2. Излагање проблема истраживања и дефинисање циља дисертације
3. Преглед постојећих доступних научних референци и постигнутих резултата из односне проблематике
4. Приказ математичког модела динамичког понашања коленастог вратила мотора
5. Приказ развијеног мерног ланца, метода мерења и поступака обраде експерименталних података
6. Идентификација непознатих и оријентационо познатих параметара математичког модела динамичког понашања коленастог вратила мотора
7. Прорачун торзионих осцилација коленастог вратила мотора
8. Осврт на могућности коришћења угаоне брзине коленастог вратила у циљу дијагностичке регуларности одвијања радних процеса у цилиндрима мотора
9. Анализа резултата истраживања
10. Закључна разматрања
11. Правци даљих истраживања
12. Литература и извори

Напред приказана структура докторске дисертације са дефинисаним предметом, циљем и планом истраживања, хипотезама, применом научних метода и очекиваним научним доприносом упућује на могући оригинални научни допринос у овој научној области.

7. ОПШТИ ЗАКЉУЧАК

Докторант је магистар техничких наука, има радове у области предложене дисертације, има искуство у области теоријских и експерименталних истраживања специфичне проблематике везане за тему дисертације и поседује способност у формирању одговарајућих опитних инсталација за односна комплексна истраживања. Комисија за оцену испуњености услова кандидата и научне заснованости теме докторске дисертације закључила је да је тема адекватна за израду докторске дисертације и да афинитети и до сада остварени резултати кандидата одговарају предложеној теми.

Комисија зато предлаже Научно-наставном већу Машинског факултета Универзитета у Београду да докторанту мр Жељку М. Булатовићу, дипл. инж. маш. одобри израду докторске дисертације под насловом

ИДЕНТИФИКАЦИЈА ПАРАМЕТАРА ЕКВИВАЛЕНТНОГ ДИНАМИЧКО - ТОРЗИОНОГ СИСТЕМА КОЛЕНАСТОГ ВРАТИЛА ДИЗЕЛ МОТОРА НА ОСНОВУ ПРОМЕНЉИВОГ ТОКА УГАОНЕ БРЗИНЕ

у научној области **Машинство**. За ментора дисертације предлаже се **др Мирољуб Томић**, редовни професор Машинског факултета Универзитета у Београду.

У Београду 02.09.2013. год.

Чланови Комисије:

1. Проф. др Мирољуб Томић, ментор
Универзитет у Београду, Машински факултет

2. Проф. др Милорад Милованчевић, декан
Универзитет у Београду, Машински факултет

3. Проф. др Александар Обрадовић
Универзитет у Београду, Машински факултет

4. Проф. др Александар Милашиновић,
Универзитет у Бања Луци, Машински факултет,
Република Српска

5. Др Ненад Миљкић, доцент
Универзитет у Београду, Машински факултет

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ

за кандидата Мр Жељка Булатовића, дипл. маш. инж.

Име и презиме ментора: Проф. др Мирољуб Томић

Звање: ред. проф. Машинског факултета у Београду

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. Miroljub V. Tomić, Slobodan J. Popović, Nenad L. Miljić, Stojan V. Petrović, Miloš R. Cvetić, Dragan M. Knežević, Zoran S. Jovanović, A quick, simplified approach to the evaluation of combustion rate from an internal combustion engine indicator diagram, Thermal Science YU ISSN 0354-9836, 1/2008, Vol. 12, pp. 85-99, doi: 10.2298/TSCI0801085T. Belgrade 2008. (IF=0,407; M23=3)
2. Zoran S. Jovanović, Stojan V. Petrović, Miroljub V. Tomić, The effect of combustion chamber geometry layout on combustion and emission, Thermal Science YU ISSN 0354-9836, 1/2008, Vol. 12, pp. 7-24, doi: 10.2298/TSCI0801007J, Belgrade 2008. (IF=0,407; M23=3)
3. Ž M Bulatović, M V Tomić, D M Knežević, and M R Cvetić, Evaluation of variable mass moment of inertia of the piston–crank mechanism of an internal combustion engine, Proc. IMechE Part D: J. Automobile Engineering, Vol. 225 Issue 5, pp. 687-702, ISSN 0954-4070, doi: 10.1177/2041299110394918, 2011. (IF=0,441; M23=3)
4. Zoran S. Jovanović, Zlatomir M. Živanović, Željko B. Šakota, Miroljub V. Tomić, Velimir S. Petrović, The effect of bowl-in-piston geometry layout on fluid flow pattern, Thermal Science, Vol 15 (2011), No.3, ISSN 0354-9836, doi: 10.2298/TSCI110417040J, Belgrade 2011. (IF=0,706; M23=3)
5. Ž. M. Bulatović, M. S. Štavljanin, M. V. Tomić, D. M. Knežević, S. Lj. Biočanin, Measurement and analysis of angular velocity variations of twelve-cylinder diesel engine crankshaft, Elsevier, Mechanical Systems and Signal Processing, ISSN 0888-3270, 8/2011, Vol.25, pp. 3043-3061, doi: 10.1016/j.ymssp.2011.05.002. (IF= 1,762; M21=8)
6. Velimir S. Petrović, Slobodan P. Janković, Miroljub V. Tomić, Dragan M. Knežević, The Possibilities for Measurement and Characterization of Diesel Engine Fine Particles, Thermal Science, ISSN 0354-9836, 4/2011, Vol. 15, pp 915-938, doi: 10.2298/TSCI110509092P, Belgrade 2011. (IF=0,706; M23=3)
7. Zoran S. Jovanović, Branislav S. Basara, Miroljub V. Tomić, Velimir S. Petrović, Some Subtleties Concerning Fluid Flow and Turbulence Modeling in 4-Valve Engines, Thermal Science, ISSN 0354-9836, 4/2011, Vol. 15, pp. 1065-1079, doi: 10.2298/TSCI110825104J, Belgrade 2011. (IF=0,706; M23=3)
8. Miljić Nenad L., Tomić Miroljub V., A neuro-fuzzy based combustion sensor for the control of optimal engine combustion efficiency, Thermal Science, 2013 17(1): 135-151, doi:10.2298/TSCI120703160M, Belgrade 2013. (IF=0,706; M23=3)

9. Popović Slobodan J., Tomić Miroljub V., Possibilities to identify engine combustion model parameters by analysis of the instantaneous crankshaft angular speed, Thermal Science, 2013 On Line-First (00):6-6, doi: 10.2298/TSCI120907006P, Belgrade 2013. (IF=0,706; M23=3)

10. Bulatović Željko M., Rakić Slavko N., Knežević Dragan M., Tomić Miroljub V., Bojer Ljubiša M., Radić Dragoslav B., Jerkin Goran L., Research of the combustion process of spark-ignition engines of the older generation in the conditions of transition from leaded petrol MB 86 to the unleaded petrol BMB 95, Thermal Science, 2013 On Line-First (00):55-55, doi:10.2298/TSCI120916055B, Belgrade 2013. (IF=0,706; M23=3)

Заокружити одговарајућу опцију (А, Б, В или Г):

А) У случају менторства дисертације на докторским студијама у групацији техничко-технолошких, природно-математичких и медицинских наука ментор треба да има најмање три рада са SCI, SSCI, AHCI или SCIE листе, као и Math-Net.Ru листе.

Б) У случају менторства дисертације на докторским студијама у групацији друштвено-хуманистичких наука ментор треба да има најмање три рада са релевантне листе научних часописа (Релевантна листа научних часописа обухвата SCI, SSCI, AHCI и SCIE листе, као и ERIH листу, листу часописа које је Министарство за науку класификовало као M24 и додатну листу часописа коју ће, на предлог универзитета, донети Национални савет за високо образовање. Посебно се вреднују и монографије које Министарство науке класификује као M11, M12, M13, M14, M41 и M51.)

В) У случају израде докторске дисертације према ранијим прописима за кандидате који су стекли академски назив магистра наука ментор треба да има пет радова (референци) које га, по оцени Већа научних области, квалификују за ментора односне дисертације.

Г) У случају да у ужој научној области нема квалификованих наставника, приложити одлуку Већа докторских студија о именовању редовног професора за ментора.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Датум _____

М.П.
