

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)

886/4

(Број захтева)

08.07.2021. 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:

МАРКА (НИКОЛА) КИТАНОВИЋА

(име, име једног од родитеља и презиме)

КАНДИДАТ **МАРКО (НИКОЛА) КИТАНОВИЋ** уписан на Докторске студије 2010. год.

(име, име једног од родитеља и презиме)

Поднео је захтев за израду докторске дисертације:

ОПТИМИЗАЦИЈА ФУНКЦИОНАЛНИХ И УПРАВЉАЧКИХ ПАРАМЕТАРА ХИБРИДНОГ ПОГОНСКОГ СИСТЕМА ВОЗИЛА ЈАВНОГ ГРАДСКОГ ПРЕВОЗА

Универзитет је дана 28.04.2021. год. својим актом под бр. 61206-1346/2-21 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

ОПТИМИЗАЦИЈА ФУНКЦИОНАЛНИХ И УПРАВЉАЧКИХ ПАРАМЕТАРА ХИБРИДНОГ ПОГОНСКОГ СИСТЕМА ВОЗИЛА ЈАВНОГ ГРАДСКОГ ПРЕВОЗА

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата: **МАРКА (НИКОЛА) КИТАНОВИЋА**
(име, име једног од родитеља и презиме)

Образована је на седници одржаној 20.05.2021. године, одлуком факултета под бр. 886/2, у саставу:

Име и презиме члана комисије	звање	научна област	установа у којој је запослен
1. Др Слободан Поповић	ванр. проф.	Мотори	Машински факултет Београд
2. Др Ненад Миљкић	ванр. проф.	Мотори	Машински факултет Београд
3. Др Драган Кнежевић	ванр. проф.	Мотори	Машински факултет Београд
4. Др Предраг Мрђа	доцент	Мотори	Машински факултет Београд
5. Др Јован Дорић	ванр. проф.	Мотори и моторна возила	Универзитет у Новом Саду Факултет техничких наука

Наставно-научно веће факултета прихватило је извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана 08.07.2021. године.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф.др Радивоје Митровић

Прилог: 1. Извештај комисије са предлогом.

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

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

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број: 886/4
Датум: 08.07.2021. године
Београд, Краљице Марије 16

На основу члана 30. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 76/2005, 100/2007 – аутентично тумачење, 97/2008, 93/2012 и 89/2013), члана 64. Статута Машинског факултета – пречишћени текст (број 1136/4 од 28.06.2021. године) и члана 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета и реферата Комисије у саставу: др Слободан Поповић, ванр. проф., ментор, др Ненад Миљић, ванр. проф., др Драган Кнежевић, ванр. проф., др Предраг Мрђа, доц. и др Јован Дорић, ванр. проф., Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука о оцени докторске дисертације „Оптимизација функционалних и управљачких параметара хибридног погонског система возила јавног градског превоза“ студента докторских студија **Марка Китановића, маг. инж. маш.**, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници одржаној 08.07.2021. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Усваја се реферат Комисије о урађеној докторској дисертацији **„ОПТИМИЗАЦИЈА ФУНКЦИОНАЛНИХ И УПРАВЉАЧКИХ ПАРАМЕТАРА ХИБРИДНОГ ПОГОНСКОГ СИСТЕМА ВОЗИЛА ЈАВНОГ ГРАДСКОГ ПРЕВОЗА“** студента **МАРКА КИТАНОВИЋА, маг. инж. маш.**

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

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

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Радивоје Митровић

ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Марка Н. Китановића**

Одлуком бр. 886/2 од 20.05.2021. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Марка Н. Китановића, маг. инж. маш., студента Докторских студија на Машинском факултету Универзитета у Београду, под насловом:

„Оптимизација функционалних и управљачких параметара хибридног погонског система возила јавног градског превоза“

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

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

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

На основу Молбе број 9/13272 од 16.09.2013. године, дата му је сагласност за мировање током школске године 2012/2013. јер није испунио услов за упис треће године студија предвиђен Правилником о докторским студијама. Кандидату је одобрено продужење студијског програма у школској 2017/2018. години према решењу 2354/1 од 06.10.2017. и у школској 2018/2019. према решењу 2163/5 од 28.09.2018. због неиспуњавања услова неопходних за пријаву теме које прописује Правилник о докторским студијама на Машинском факултету. На основу Молбе број 9/1449 од 30.09.2020., дата му је сагласност за мировање током школске 2019/2020. због разлога одсуства дужег од 6 месеци, према решењу 1398/97 од 30.09.2020. Кандидату је одобрено продужење студијског програма у школској 2020/2021. години према решењу 1385/1 од 30.09.2020., а на основу молбе бр. 9/1450 од 30.09.2020.

Кандидат Марко Н. Китановић, маг. инж. маш., пријавио је тему докторске дисертације под називом „Оптимизација функционалних и управљачких параметара хибридног погонског система возила јавног градског превоза“ 01.07.2019. године (арх. бр. 1227/1) и за ментора је предложио проф. др Слободана Ј. Поповића. На основу пријаве кандидата, Наставно-научно

веће Машинског факултета у Београду је прихватило предлог дисертације, а на основу предлога Катедре за моторе (арх. бр. 87/2 од 21.01.2021. год.), именовало Комисију за подношење извештаја о прихватању теме докторске дисертације и њене научне заснованости у саставу: др Слободан Ј. Поповић, ванр. проф., ментор, др Ненад Миљић, ванредни професор, др Јован Дорић, ванредни професор Факултета техничких наука Универзитета у Новом Саду.

На основу извештаја Комисије (арх. бр. 87/3) од 22.02.2021., Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду 18.03.2021. доноси одлуку (арх. бр. 87/4), 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 28.04.2021. донело одлуку да се даје сагласност на предлог теме докторске дисертације Марка Н. Китановића, маг. инж. маш, (одлука бр. 61206-1346/2-21), а на основу чега је 20.05.2021. одлуком број 886/2, именована Комисија за оцену и одбрану предметне докторске дисертације под менторством проф. др Слободана Ј. Поповића.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација „Оптимизација функционалних и управљачких параметара хибридног погонског система возила јавног градског превоза” припада области техничких наука (машинство) и ужој научној области Мотори са унутрашњим сагоревањем.

Израдом докторске дисертације руководио је др Слободан Ј. Поповић, ванредни професор на групи предмета из области Мотора СУС на Катедри за Моторе Машинског факултета Универзитета у Београду.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Кандидат Марко Китановић је рођен 29. јануара 1986. године у Женеви, Швајцарска. Прва 4 разреда основне школе (1993–1997) завршио је у „Ecole n°8 du Bois de la Cambre“, у Бриселу, Белгија. Пети, шести и седми разред (1997–2000) завршио је у ОШ „Радоје Домановић“, у Београду, Република Србија. Основну школу (9 разреда у француском образовном систему) завршио је у „Collège Molière“, у Паризу, Француска, 2002. године. Након тога похађа и завршава прва два разреда средње школе (укупно 3 разреда у француском образовном систему) у „Lycée Louis Armand“ (научно усмерење), у Паризу, Француска. Средње образовање завршио је у Земунској гимназији (природно-математички смер) 2005. године.

Машински факултет Универзитета у Београду кандидат је уписао 2005. године, а Основне академске студије (ОАС) на одсеку Мотори СУС завршио је 2008. године са просечном оценом 8,91 (осам и 91/100). Током студија награђиван је за изванредан успех постигнут на Машинском факултету Универзитета у Београду на другој и трећој години Основних академских студија. Завршни рад на Основним академским студијама под насловом „Анализа идеализованих термодинамичких циклуса мотора“, чији је ментор био проф. др Мирољуб Томић, одбранио је на Катедри за моторе са оценом 10 (десет).

Мастер академске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду кандидат је уписао 2008. године на модулу Мотори СУС и завршио 2010. године са просечном оценом 9,90 (девет и 90/100), одбранивши М. Sc. рад под насловом „Истраживање примене поступка турбоекспанзије код мотора СУС“, чији је ментор био проф. др Мирољуб Томић, са оценом 10 (десет). Кандидат је награђиван за изванредан успех постигнут на првој и другој години Мастер академских студија.

Укупна просечна оцена студија кандидата на Машинском факултету у Београду износи 9,41 (девет и 41/100).

Докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду кандидат је уписао 2010. године. Од јануара 2011. године кандидат је запослен на Машинском факултету као сарадник на пројекту Катедре за моторе „Истраживање и развој алтернативних погонских система и горива за градске аутобусе и комунална возила ради побољшања енергетске ефикасности и еколошких карактеристика“, који у текућем пројектном циклусу финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије. (ТР-35042). Од 11.07.2013. године запослен је на Катедри за моторе Машинског факултета Универзитета у Београду као асистент.

Током рада на Катедри за моторе Машинског факултета Универзитета у Београду, кандидат је био ангажован за одржавање аудиторних и лабораторијских вежби из већине предмета матичног усмерења (Конструкција аутомобилских мотора – увод, Индустијски компресори, Хибридни погонски системи, Експлоатација и ремонт мотора, Стручна пракса Б – МОТ, Стручна пракса Б – МФБ, Радни процеси мотора, Основе симулација радног процеса мотора СУС, Натпуњење мотора, Конструкција мотора 2, Бродски мотори, Изабрана поглавља из области мотора СУС 1).

Кандидат је био ангажован у пружању стручне помоћи студентском тиму „Формула студент“ на припремама за наступе на међународним такмичењима у сезони 2011–2012. У оквиру тих активности, током припреме и у раду са лабораторијском инсталацијом за испитивање такмичарског мотора, уводио је студенте у проблематику испитивања мотора применом најсавременијих мерних техника као и у специфичности софтвера и апликација за дигиталну аквизицију података и обраду мерених величина са пробног стола за моторе. Такође, био је ангажован на развоју и оптимизацији апликативног софтвера за прикупљање, обраду и чување података са мерних ланаца пробног стола и електронске управљачке јединице, као и на самом извођењу испитивања и оптимизацији рада мотора.

Током лета 2012. године кандидат је похађао професионалну обуку за софтверско развојно окружење LMS AMESim у развојном центру компаније LMS Imagine у Минхену, Немачка.

Кандидат је активно учествовао у реализацији више од 10 дипломских радова пружајући студентима кроз консултације драгоцену помоћ у развоју разноврсних софтверских апликација и нумеричких симулација, као и у припреми инсталација за експериментална испитивања.

Посебно треба истаћи рад на развоју сложене платформе за експерименталну верификацију нове методе за динамичка испитивања перформанси мотора (SDS –Slow Dynamic Slope) која је кроз два мастер рада, реализована уз техничку подршку компаније AVL GmbH из Граца.

Кандидат у раду активно користи програмске пакете и развојна окружења Mathworks MATLAB/Simulink, NI LabVIEW, NI DIAdem, AVL BOOST, AVL Concerto, Ricardo WAVE, Simcenter Amesim, Autodesk AutoCAD, Microsoft Office.

Кандидат поседује активно знање француског и енглеског језика и служи се шпанским језиком.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација, кандидата Марка Н. Китановића, маг. инж. маш., под називом „**Оптимизација функционалних и управљачких параметара хибридног погонског система возила јавног градског превоза**“ изложена је на 166 страница и садржи 39

нумеричких израза, 175 слика и дијаграмских приказа, 23 табела и 107 коришћених референтних литературних извора. Докторску дисертацију чине следећих седам поглавља:

1. Уводна разматрања
2. Хибридни погонски системи
3. Математичко моделирање хибридних погонских система
4. Оптимизација функционалних и управљачких параметара хибридних погонских система
5. Извођење алгоритма управљања применом неуронских мрежа
6. Оцена управљачког алгоритма заснованог на примени вештачких неуронских мрежа
7. Закључак и смернице за даља истраживања

На крају рада дат је и Додатак са табелама и дијаграмским приказима параметара обрађених возних циклуса.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У *првом поглављу*, који представља уводна разматрања докторске дисертације, дат је осврт на тренутне и будуће енергетске потребе у сектору транспорта робе и путника. Појашњена је улога и утицај коју хибридни погонски системи могу имати у повећању ефикасности транспорта и смањењу његових неповољних утицаја на човекову околину. Анализирани су инжењерски изазови које је потребно отклонити ради успешне примене хибридних погонских система и уведена је проблематика оптимизације функционалних и управљачких параметара система, која је предмет ове дисертације.

Друго поглавље садржи општи приказ концепта хибридног погонског система. Описана је подела система према функционалности, архитектури, врсти и диспозицији елемената додатног претварача и акумулатора енергије. Дат је преглед релевантне литературе из области примене електричних и хидрауличних хибридних погонских система за погон тешких возила и сумирани су резултати уштеде горива применом паралелних и серијских архитектура. Анализиране су специфичности у погледу фреквенције и снаге кочења за различите врсте возила и припадајуће уобичајене возне циклусе и донети закључци у вези оптималног одабира типа акумулатора енергије за возило градског јавног саобраћаја. Дат је преглед радова из области оптимизације функционалних и управљачких параметара хибридних погонских система са освртом на примењене методе и математичке моделе акумулатора енергије. Уставновљено је да је мали број истраживања посвећен проблематици оптимизације функционалних параметара хидро-пнеуматских акумулатора и утврђивања утицаја њихових појединих радних параметара на укупни степен корисности погонског система. Извршена је подела и анализа доступних метода за оптимизацију управљачких параметара хибридног погонског система и предложена је метода заснована на примени динамичког програмирања и вештачких неуронских мрежа.

У *трећем поглављу* описане су методологија и процедуре експерименталног испитивања спроведеног у оквиру предметног истраживања. Описан је аквизициони систем који је коришћен за прикупљање радних параметара погонског система аутобуса у стварним експлоатационим условима. Представљени су резултати добијени обрадом снимљених података и описана је метода анализе параметара возног циклуса у погледу утицаја саобраћајних застоја на одвијање превоза. Приказана је методологија формирања различитих класа возних циклуса за репрезентативна оптерећења у саобраћају. Представљен је развијен и примењен математички модел конвенционалног погонског система који је калибрисан према параметрима који су идентификовани обрадом података добијених експерименталним истраживањем. На крају, приказани су развијени и примењени математички модели алтернативних погонских система који чине додатну погонску машину (електрични

мотор/генератор и хидраулички мотор/пумпа), као и модели акумулатора енергије (електрични суперкондензатори и хидро-пнеуматски акумулатор). Ови елементи чине окосницу надградње која омогућује разматрање потенцијалних перформанси хибридног погонског система примењеног на калибрисаном моделу конвенционалног погонског система.

У оквиру *четвртог поглавља* разрађена је проблематика оптимизације функционалних и управљачких параметара разматраних решења хибридног погонског система. Дефинисан је проблем оптимизације система, приказана је примена математичке методе динамичког програмирања уз припадајуће вредности граничних услова и, коначно, представљени су резултати прорачуна. За модел електричног хибридног погонског система, приказани су потенцијали уштеде горива за различите вредности функционалних параметара (преносни однос између електричне машине и мењача, вредност номиналне снаге електричне машине, број коришћених ултракондензаторских модула, као и максимална вредност јачине електричне струје кроз систем). Препознат је знатан утицај номиналне снаге електро-мотора на потенцијалну уштеду горива. Такође, ограничавањем јачине електричне струје кроз систем, могуће је квантификовати њен утицај на повећање потрошње и извршити оптимизацију погона уз разматрање поузданости и трајности акумулатора енергије. За модел хидрауличног хибридног погонског система, извршена је свеобухватна анализа функционалних параметара хидро-пнеуматског акумулатора на укупни степен корисности погона. Коришћене су различите вредности преднапрезања акумулатора (тј. укупне масе азота), капацитета и масе еластомерне пене на учинак система. Утврђене су и појашњене међузависности релевантних параметара на максималну потенцијалну уштеду горива система. Иако је ефикасност хидро-пнеуматских акумулатора врло висока и неретко достиже вредности изнад 95%, повећање учинка целокупног хибридног погонског система у датим експлоатационим околностима и за задате реалне граничне услове могуће је постићи и избором параметара који доводе до смањења степена корисности акумулатора услед знатно мање укупне прикупљене енергије у фазама кочења.

У *петом поглављу* објашњена је предложена метода за управљање радом хибридног погонског система. Представљени су резултати и закључци у погледу извођења алгоритма управљања из решења добијених применом динамичког програмирања. Циљ је формулисати модел управљања који је примењив на објекту у реалном времену, а који ће обезбедити учинак који је што ближи управљању заснованом на динамичком програмирању у свим експлоатационим условима. Приказан је кратки преглед и подела техника, метода и алгоритама машинског учења као области вештачке интелигенције. Представљен је тип и конфигурација изабране неуронске мреже за извођење алгоритма управљања. Описани су подаци који су коришћени у процесу тренирања вештачких неуронских мрежа. Коришћено је укупно пет варијанти подешавања изабраног типа неуронске мреже са различитим вредностима задршки спољних параметара и стања мреже, као и бројем неурона у скривеном слоју мреже. Извршена је статистичка анализа параметра расподеле оптерећења хибридног погонског система добијеног применом вештачке неуронске мреже и оптималних вредности (динамичко програмирање) и приказане су расподеле грешке праћења оптималног тока за све варијанте конфигурација.

Оцена управљачког алгоритма заснованог на примени вештачких неуронских мрежа дата је у *шестом поглављу*. Из скупа снимљених возних циклуса, изабрано је укупно шест карактеристичних за различите услове саобраћаја. За сваки смер кретања, изабрани су возни циклуси са ниским, средњим и високим оптерећењем у саобраћају. Формирани су симулациони модели са изабраним циклусима који су искоришћени за спровођење оптимизационог прорачуна управљања хидрауличним хибридним погонским системом применом динамичког програмирања. Тиме је омогућена оцена алгоритма управљања заснованог на примени вештачких неуронских мрежа поређењем укупних потрошња горива мотора СУС. Изабрано је укупно шест конфигурација мрежа са најмањим средњим

квадратним одступањем у праћењу оптималног тока расподеле оптерећења. Најпре су симулације спроведене користећи само једну мрежу по разматраној конфигурацији, и то оне које су показале најбољи учинак. Касније је модел управљања надограђен способношћу да комбинује све успешно истрениране мреже и да за сваки временски инкремент симулације израчуна аритметичку средину расподеле оптерећења свих десет мрежа. На крају, представљени су резултати анализе и поређења потрошње горива за све разматране неуронске мреже и изведени су закључци у погледу оствареног степена корисности погонског система.

У последњем поглављу дати су закључци овог истраживања и смернице за будући рад на тему оптимизације хибридних погонских система.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација под називом „Оптимизација функционалних и управљачких параметара хибридног погонског система возила јавног градског превоза“ кандидата Марка Н. Китановића представља савремен и оригиналан допринос у области оптимизације хибридних погонских система.

Имајући у виду вишедимензионални карактер управљања и све већу сложеност савремених погонских система, нарочито хибридних решења, не изненађује чињеница да се све већи број истраживачких напора улаже у повећање ефикасности транспорта људи и добара. Основни циљ тих истраживања огледа се у изналажењу нових начина за задовољавање све оштријих законских одредби у погледу токсичне издувне емисије и смањења потрошње горива, уз задржавање повољних перформанси возила. Један од највећих изазова који треба превазићи ради већег пробоја хибридних погонских система јесте оптимизација функционалних и управљачких параметара система. Оптимални функционални параметри зависе од масе и носивости возила, возног циклуса (профила брзине и убрзања, конфигурације терена, итд.) и као такви представљају компромис за одређени скуп утицајних фактора и граничних услова који су карактеристични за објекат оптимизације и његове експлоатационе услове. Одатле и потреба да се проблемом оптимизације хибридних погонских система приступи на систематични и свеобухватни начин.

Постојање додатне погонске машине и алтернативног акумулатора енергије условљава потребу оптимирања додатних управљачких параметара хибридног система. Наиме, за сваки тренутак и захтевано оптерећење погонског система, потребно је установити оптималну расподелу оптерећења између мотора СУС и додатне погонске машине ради смањења укупне потрошње горива током разматраног возног циклуса и најефикаснијег искоришћења енергије добијене у фазама регенеративног кочења возила. За решавање поменутог проблема оптимизације, могуће је користити проверене математичке методе, попут динамичког програмирања. Главни недостаци оваквих метода огледају се у експоненцијалном повећању потребног времена за решавање проблема са повећањем броја стања система, као и немогућност њене директне примене на објектима у реалном времену услед потребе да се проблем оптимизације дефинише у целокупном временском домену. У овом истраживању испитана је могућност примене синтеза метода динамичког програмирања и математичких модела заснованих на вештачким неуронским мрежама ради формирања алгорита управљања примењивог у реалном времену.

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

- Развој хардверске конфигурације и софтверске апликације за аутономну аквизицију података на возилу јавног градској превоза у стварним експлоатационим условима,
- Развој метода и програма за обраду и анализу снимљених података,
- Развој метода за анализу параметара возног циклуса у погледу утицаја саобраћајних застоја на одвијање превоза,
- Развој програма и калибрација модела за симулацију конвенционалних погонских система на основу снимљених и обрађених података,
- Развој програма и модела за симулацију хибридних погонских система заснованих на електричним и хидрауличким уређајима за погон и складиштење енергије,
- Примена решења за оптимизацију функционалних и управљачких параметара хибридног погонског система употребом методе динамичког програмирања,
- Развој синтезне методе за извођење алгоритма управљања из резултата оптимизације динамичког програмирања, засноване на примени неуронских мрежа и
- Примена изведеног алгоритма управљања на модел хибридног погонског система и оцена и поређење перформанси у односу на оптималне перформансе хибридног погонског система добијене применом динамичког програмирања.

Оригиналан приступ коришћен у истраживању, као и добијени резултати настали свеобухватном анализом функционалних параметара елемената система, дају значајан допринос области оптимизације хибридних погонских система. Значај се посебно односи на аспект смањења потрошње горива, што је један од највећих проблема са којима се суочавају савремени приступи у поступцима оптимизације погонских система.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Прегледом цитиране литературе, издвојене у поглављу Литература, закључује се да је кандидат Марко Н. Китановић при изради дисертације користио литературу која је референтна и актуелна. У циљу систематизације резултата постојећих истраживања из области која је предмет дисертације, кандидат је навео значајне референце које за тему имају оптимизацију хидрауличних хибридних погонских система.

У докторској дисертацији коришћена је обимна савремена и релевантна литература из области симулације, испитивања, управљања и конструкције хибридних погонских система, као и литература из области теорије и примене вештачких неуронских мрежа. 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 оптимизације функционалних и управљачких параметара хибридних погонских система. Критичка анализа постојећих метода оптимизације и анализе омогућила је примену оригиналне методе и приступа приказаних у дисертацији. Истицањем најважнијих резултата, презентованих у коришћеној литератури, дат је релевантан приказ постојећег стања у областима, које су биле предмет истраживања кандидата током рада на дисертацији. Коришћене референце представљају избор савремене литературе, која приказује актуелно стање у предметној области истраживања у свету, али које указују и на могуће правце даљег научног рада.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

За реализацију постављених циљева истраживања коришћено је више различитих научно-истраживачких метода. Ради формирања математичког модела конвенционалног погонског система, примењене су експерименталне методе испитивања и прикупљања радних

параметара мотора СУС у возилу јавног градског превоза који је саобраћао у реалним експлоатационим условима. Састављена је хардверска конфигурација и развијена софтверска апликација за аутономно прикупљање података са целокупне CAN комуникационе мреже аутобуса и GPS пријемника. Од кључног значаја за истраживање било је прикупити и обрадити поруке које садрже информације о тренутној потрошњи горива, брзини кретања возила, броју обртаја коленастог вратила и оптерећењу мотора СУС, тренутном степену преноса мењача, итд. Позицију возила било је потребно бележити ради одређивања нагиба пута возног циклуса. Велика количина сирових података коришћена је као улаз у развијене математичке методе обраде и анализе сигнала ради идентификације карактеристика елемената погонског система потребних за формирање калибрисаног симулационог модела хибридног погонског система. Овај симулациони модел послужио је као основа за формирање модела хибридног погонског система над којим су спроведени оптимизациони прорачуни применом методе динамичког програмирања.

Применом метода аналитичког приступа обрађени су утицаји функционалних параметара хидро-пнеуматског акумулатора на радне параметре хибридног погонског система, његов степен корисности као и укупне количине прикупљене енергије у фазама кочења возила. Посебно је важно истаћи значај примењене свеобухватне анализе показатеља учинка у спрези са примењеним граничним условима система и експлоатационим условима услед великих међузависности параметара. Истраживањем у оквиру ове дисертације утврђена је веза између свих релевантних параметара акумулатора енергије и минимално оствариве потрошње горива, чиме је омогућена оптимизација функционалних параметара хидрауличног хибридног погонског система у датим експлоатационим околностима.

Због немогућности примене резултата динамичког програмирања на објекту у реалном времену, испитана је и истраживана синтеза тог алгорита оптимизације и модела заснованих на неуронским мрежама ради извођења модела управљања. Скуп података који је подразумевао оптималну расподелу оптерећења између мотора СУС и алтернативног претвараача енергије, као и радне параметре који дефинишу стање хибридног погонског система, коришћен је за процес тренирања вештачких неуронских мрежа различитих конфигурација, ради извођења образаца који су карактеристични за управљање које минимизује потрошњу горива.

3.4. Применљивост остварених резултата

Главни резултати ове дисертације јесу:

- Анализа утицаја масе еластомерне пене, притиска преднапрезања (тј. масе гаса) и радне запремине хидро-пнеуматског акумулатора на укупни степен корисности хидрауличног хибридног погонског система и минимално оствариву потрошњу горива;
- Успостављање методологије и процедура за аутономно прикупљање радних параметара погонског система и возила у стварним експлоатационим условима ради формирања и анализе карактеристичних возних циклуса и калибрацију параметара симулационог модела система.
- Успостављање модела управљања хибридним погонским системом употребом концепта машинског учења и применом модела заснованих на вештачким неуронским мрежама и резултата оптимизације управљачких параметара добијених методом динамичког програмирања.

Предложена синтеза различитих метода ради формирања примењивог алгорита управљања може се употребити на врло великом скупу погонских система различитих концепција и

конфигурација, али и осталих машинских система, са различитим и вишедимензионалним критеријумима оптимизације и дефинисаним граничним условима.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

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

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру рада на дисертацији „Оптимизација функционалних и управљачких параметара хибридног погонског система возила јавног градског превоза“ кандидат Марко Н. Китановић је потврдио и проширио постојећа знања у области оптимизације хибридних погонских система са анализом утицаја параметара хидро-пнеуматског акумулатора на минимално оствариву потрошњу горива хидрауличног хибридног погонског система.

Научни допринос предметне дисертације је:

- Свеобухватна анализа утицаја функционалних параметара хидро-пнеуматског акумулатора на радне параметре, степен корисности и минимално оствариву потрошњу горива хидрауличних хибридних погонских система.

Стручни допринос предметне дисертације је:

- Синтеза оптимизационе методе динамичког програмирања и математичких модела заснованих на вештачким неуронским мрежама у процесу формирања примењивог управљачког алгоритма који ће обезбедити адекватан учинак хибридног погонског система у различитим експлоатационим условима.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

С обзиром на високу комплексност савремених погонских система и све захтевнија ограничења, посебно у смислу задовољавања прописа о економичности и издувној емисији, све већи напори улажу се у оптимизацију и специјализацију комерцијалних и возила за сопствени превоз. Функционални параметри хибридног погонског система подразумевају енергетске капацитете акумулатора енергије, претварача енергије (мотори/генератори код електричних хибридних система, мотори/пумпе код хидрауличких хибридних погонских система), као и диспозицију алтернативног погонског система и преносне односе између конвенционалне и алтернативне погонске машине. Оптимални функционални параметри зависе од масе и носивости возила, возног циклуса (профила брзине и убрзања, конфигурације терена, итд.) и као такви представљају компромис за одређени скуп утицајних фактора који су најчешће присутни код објекта оптимизације.

Посебан проблем представљају хидраулични хибридни погонски системи код којих се за складиштење енергије алтернативног претварача употребљавају хидро-пнеуматски акумулатори које одликују врло ниске вредности специфичне енергије. Управо зато, јавља се потреба да се пажљивим избором параметара акумулатора омогући максимално прикупљање

енергије кочења у фазама возног циклуса када ће и резултујуће уштеде у потрошњи бити највеће. Формирањем аналитичког модела хидро-пнеуматског акумулатора и детаљног симулационог модела хидрауличког хибридног погонског система, извршено је утврђивање и детаљна анализа утицаја масе еластомерне пене, притиска преднапрезања и радне запремине хидро-пнеуматског акумулатора на степен корисности погонског система возила јавног градског превоза у целини, кроз разматрање укупног остваривог потенцијала у апсорбовању и складиштењу енергије кочења.

Поред већ великих изазова у погледу управљања сложеним динамичким системима као што су мотори СУС, код хибридних погонских система потребно је ускладити рад најмање два разнородна претварача енергије у сваком временском тренутку уз постизање високих перформанси у погледу економичности, буке, поузданости, издувне емисије, итд.

У погледу оптимизације управљачких параметара, треба истаћи да методе које изводе глобално оптимално решење расподеле оптерећења између два претварача енергије није могуће применити на објекту у реалном времену услед потребе да се проблем оптимизације детерминистички одреди у целокупном временском домену. Управљачки алгоритми и модели које је могуће применити неминовно доводе до смањења учинка у односу на методе које дају глобално оптимална решења. Поред тога, неки од примењених модела управљања захтевају нарочито велику процесорску моћ. С тим у вези, у предметној дисертацији испитана је могућност примене метода заснованих на неуронским мрежама у процесу извођења и примене оптималног управљачког алгоритма. На основу снимљених возних циклуса, формиран је оптималан алгоритам управљања употребом референтне методе динамичког програмирања који је потом употребљен као улазни скуп података за тренирање вештачких неуронских мрежа различитих конфигурација. Постигнут је степен оптималности од око 80% у односу на референтну методу оптимизације применом модела неуронских мрежа које не захтевају велику процесорску моћ.

4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат Марко Н. Китановић је, кроз усавршавање и рад на више научних и стручних пројеката, био аутор и коаутор 30 радова на домаћим и међународним скуповима и у часописима. Учествовао је у реализацији већег броја инсталација намењених унапређењу наставе и актуелним научним и комерцијалним истраживањима Катедре за моторе.

Научни допринос кандидата у смислу анализе утицаја функционалних параметара хидро-пнеуматског акумулатора на радне параметре, степен корисности и минимално оствариву потрошњу горива хидрауличних хибридних погонских система приказан је у поглављу 4 предметне дисертације и објављен у раду „*Numerical Analyses of a Hydraulic Hybrid Powertrain System for a Transit Bus*“ у часопису „*Thermal Science*“ категорије M22 и доступан је на адреси: <http://thermalscience.vinca.rs/pdfs/papers-2019/TSCI190308172K.pdf>

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

Научни радови у истакнутим међународним часописима, категорије M22

1. Kitanovic, M.N., Popovic, S.J., Miljic, N.L., Mrdja, P.D.: Numerical Analyses of a Hydraulic Hybrid Powertrain System for a Transit Bus, *Thermal Science*, vol. 24, no. 1A, pp. 159-170, 2020 (IF=1.574) (ISSN 0354-9836)

Научни радови саопштени на скупу међународног значаја, штампани у целини, категорије M33

2. Kitanovic, M.N., Popovic, S.J., Miljic, N.L., Cvetic, M., Tomic, M.V., Mrdja, P.D.: "Hydraulic Hybrid Technology Review – Perspectives and Benefits of its Implementation on Public Transportation Vehicles," *15th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia*, Soko Banja, Serbia, 2011., pp. 752 – 760.
3. Mrdja, P.D., Miljic, N.L., Popovic, S.J., Kitanovic, M.N., Petrovic, V., "Assesment of Fuel Economy Improvement Potential for a Hydraulic Hybrid Transit Bus," *Proceedings of the Green Design Conference*, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2012., pp. 129 – 134.
4. Kitanovic, M.N., Mrdja, P.D., Petrovic, V., Miljic, N.L., Popovic, S.J., Tomic, M.V.: "A Simulation Study of Fuel Economy Improvement Potentials of a Transit Bus," *Proceedings of the 24th International Automotive Conference Science and Motor Vehicles*, Belgrade, Serbia, 2013., pp. 56 – 67.
5. Kitanovic, M.N., Popovic, S.J., Miljic, N.L., Mrdja, P.D., Tomic, M.V.: "Simulation Study of a Transit Bus Equipped with an Ultracapacitor-Based Hybrid System," *Proceedings of the 11th International Conference on Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology*, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, 2013., pp. 943 – 948.
6. Kitanovic, M.N., Mrdja, P.D., Popovic, S.J., Miljic, N.L.: "Fuel Economy Comparative Analysis of Conventional and Ultracapacitors-Based, Parallel Hybrid Electric Powertrains for a Transit Bus," *International Congress Motor Vehicles & Motors*, Kragujevac, Serbia, 2014., pp. 258 – 267.
7. Kitanovic, M.N., Popovic, S.J., Miljic, N.L., Mrdja, P.D.: "Dynamic Programming Study of a Hybrid Electric Powertrain System for a Transit Bus," *18th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia*, Soko Banja, Serbia, 2017., pp. 988 – 997.
8. Kitanovic, M.N., Popovic, S.J., Miljic, N.L., Mrdja, P.D.: "A Neural Network-Based Control Algorithm for a Hydraulic Hybrid Powertrain System," *International Congress Motor Vehicles & Motors*, Kragujevac, Serbia, 2020.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу прегледа и детаљне анализе докторске дисертације под називом „**Оптимизација функционалних и управљачких параметара хибридног погонског система возила јавног градског превоза**“, кандидата Марка Н. Китановића, магистар инжењерских наука, Комисија за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације констатује да урађена дисертација представља оригиналан научни допринос у проучавању оптимизације хибридних погонских система, да је дисертација написана према свим стандардима научно-истраживачког рада и да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Машинског факултета Универзитета у Београду.

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да прихвати овај Извештај, да дисертацију „**Оптимизација функционалних и управљачких параметара хибридног погонског система возила јавног градског превоза**“ кандидата Марка Н. Китановића, магистар инжењерских наука, заједно са овим Извештајем стави на увид јавности у складу са законским одредбама, и да потом целокупни материјал упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

Проф. др Слободан Поповић, ванредни професор, ментор
Универзитет у Београду, Машински факултет

Проф. др Ненад Миљић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

Проф. др Драган Кнежевић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Предраг Мрђа, доцент
Универзитет у Београду, Машински факултет

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

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број: 886/4
Датум: 08.07.2021. године
Београд, Краљице Марије бр. 16

На основу члана 40. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 88/2017 и 27/2018-др. закон), члана 48. Правилника о докторским студијама, члана 64. Статута Машинског факултета - пречишћен текст (број 1136/4 од 28.06.2021. године) и члана 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета, Наставно-научно веће на седници одржаној 08.07.2021. године, донело је

ОДЛУКУ

Усваја се реферат Комисије о урађеној докторској дисертацији **„ОПТИМИЗАЦИЈА ФУНКЦИОНАЛНИХ И УПРАВЉАЧКИХ ПАРАМЕТАРА ХИБРИДНОГ ПОГОНСКОГ СИСТЕМА ВОЗИЛА ЈАВНОГ ГРАДСКОГ ПРЕВОЗА“** студента **МАРКА КИТАНОВИЋА**, маг. инж. маш.

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

Универзитет у Београду је својом Одлуком број 61206-1346/2-21 од 28.04.2021. године, дао сагласност на предлог теме докторске дисертације.

Објављени радови студента у часописима међународног значаја:

1. Kitanovic, M.N., Popovic, S.J., Miljic, N.L., Mrdja, P.D.: Numerical Analyses of a Hydraulic Hybrid Powertrain System for a Transit Bus, *Thermal Science*, vol. 24, no. 1A, pp. 159-170, 2020 (**IF=1.574**) (ISSN 0354-9836)

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

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Радивоје Митровић