Образац 2.

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

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

456/5

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

(Број захтева)
15.03.2018. године
(Датум)

З А Х Т Е В
за давање сагласности на реферат о урађеној докторској дисертацији

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

МИШЕ (ДРАГИ) СТОЈИЋЕВИЋА
(име,име једног од родитеља и презиме)

КАНДИДАТ **МИША (ДРАГИ) СТОЈИЋЕВИЋ уписан на Докторске студије 2011. год.**
(име, име једног од родитеља и презиме**)**

Поднео је захтев за израду докторске дисертације:
НЕЛИНЕАРНА ДИНАМИКА САТНИХ МЕХАНИЗАМА

Универзитет је дана 28.08.2017. год. својим актом под бр. 61206-3093/2-17 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:
НЕЛИНЕАРНА ДИНАМИКА САТНИХ МЕХАНИЗАМА

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата: **МИШЕ (ДРАГИ) СТОЈИЋЕВИЋА**
(име,име једног од родитеља и презиме)

Образована је на седници одржаној 22.02.2018. године, одлуком факултета под бр.456/2 , у саставу:

Име и презиме члана комисије	звање	научна област	установа у којој је запослен
1. Др Бранислав Попконстантиновић	Ред. проф.	Теорија механизама и машина и Инжењерско цртање са нацртном геометријом	Машински факултет Београд
2. Др Љубомир Миладиновић	Ред. проф.	Теорија механизама и машина и Инжењерско цртање са нацртном геометријом	Машински факултет Београд
3. Др Драган Петровић	Ред. проф.	Теорија механизама и машина и Инжењерско цртање са нацртном геометријом	Машински факултет Београд
4. Др Зорана Јели	Доцент	Теорија механизама и машина и Инжењерско цртање са нацртном геометријом	Машински факултет Београд
5. Др Ратко Обрадовић	Ред. проф.	Рачунарска графика	ФТН Нови Сад

Наставно-научно веће факултета прихватило је извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана 15.03.2018. 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: 456/4
Датум: 15.03.2018. 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 63. Статута Машинског факултетета (број 1876/1 од 04.10.2013. године) и члана 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета и реферата Комисије у саставу: др Бранислав Попконстантиновић, ред. проф., ментор, др Љубомир Миладиновић, ред. проф., ментор, др Драган Петровић, ред. проф., др Зорана Јели, доц. и др Ратко Обрадовић, ред. проф., Универзитет у Новом Саду – Факултет техничких наука, о оцени докторске дисертације „Нелинеарна динамика сатних механизама“ студента докторских студија **Мише Стојићевића**, **маст. инж. маш**., Наставно-научно веће Машинског факултета на седници одржаној 15.03.2018. године, донело је следећу

О Д Л У К У

Усваја се реферат Комисије о урађеној докторској дисертацији **„НЕЛИНЕАРНА ДИНАМИКА САТНИХ МЕХАНИЗАМА“** студента **МИШЕ СТОЈИЋЕВИЋА**, **маст. инж. маш.**

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

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

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Радивоје Митровић

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
Машински факултет

ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Мише Стојићевића, маст. инж. маш.

Одлуком 456/2 бр. од 22.02.2018. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Мише Стојићевића, маст. инж. маш., под насловом

„НЕЛИНЕАРНА ДИНАМИКА САТНИХ МЕХАНИЗМА“

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

Р Е Ф Е Р А Т

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат Миша Стојићевић, маст. инж. маш., уписао је докторске студије на Машинском факултету у школске 2011/12. године, бр. индекса Д09/11. Кандидат је пријавио тему докторске дисертације под насловом „Нелинеарна динамика сатних механизама“ на Машинском факултету, Универзитета у Београду по пријави бр. 1115/1 од 22.05.2017. год. На основу пријаве кандидата, предлога Катедре за Теорију механизама и машина број 1115/2 од 05.06.2017. , и одлуке Наставно-научног већа Машинског факултета, Универзитета у Београду, број 1115/3 од 22.06.2017. именована је комисија за оцену подобности теме и кандидата у саставу:

- др Бранислав Попконстантиновић, ред. проф., ментор
- др Љубомир Миладиновић , ред. проф., ментор
- др Драган Петровић , ред. проф.
- др Зорана Јели, доцент
- др Ратко Обрадовић , ред. проф., Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду

Након тога је Већу докторских студија предат реферат Комисије под бројем 1115/4 од 30.06.2017. По добијању сагласности Већа докторских студија Машинског факултета да се прихвата научна заснованост теме докторске дисертације Одлуком 1115/5 од 13.07.2017. поднет је захтев Већу научних области техничких наука. Веће научних области техничких наука је дало своју сагласност одлуком 61206-3093/2-17 од 28.08.2017. чиме је кандидату Миши Стојићевићу, маст. инж. маш., дата сагласност на предлог теме докторске дисертације под називом „Нелинеарна динамика сатних механизама“ под менторством др Љубомира Миладиновића, ред. проф., и др Бранислава Попконстантиновића, ред. проф. Професори др Љубомир Миладиновић и др Бранислав Попконстантиновић су обавестили Наставно-научно

веће Машинског факултета Универзитета у Београду о завршетку докторске дисертације Мише Стојићевића, маст. инж. маш., дописом број 456/1 од 20.02.2018. Наставно-научно веће је 22.02.2018. донело одлуку 456/2 о именовању комисије за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу:

- др Бранислав Попконстантиновић, ред. проф., ментор
- др Љубомир Миладиновић , ред. проф., ментор
- др Драган Петровић , ред. проф.
- др Зорана Јели, доцент
- др Ратко Обрадовић , ред. проф., Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација Мише Стојићевића под називом „Нелинеарна динамика сатних механизама“ припада области техничких наука, научна област машинство, ужа научна област Теорија механизама и машина и инжењерско цртање са нацртном геометријом за коју је матичан Машински факултет Универзитета у Београду.

Ментори проф. др Љубомир Миладиновић и проф. др Бранислав Попконстантиновић су редовни професори на Катедри за Теорију механизама и машина Машинског факултета Универзитета у Београду. Проф. др Љубомир Миладиновић је аутор или коаутор 10 радова а проф. др Бранислав Попконстантиновић је аутор или коаутор 11 радова публикованих у међународним часописима категорије М23 у ужим научним областима предметне дисертације.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Миша (Драги) Стојићевић, рођен је 24.06.1987. године у Пожаревцу. По завршеној основној школи „Иво Лола Рибар“ у Великом Градишту уписао је техничку школу „Никола Тесла“ у Костолцу, где је матурирао 2006. године. Машински факултет Универзитета у Београду уписао је 2006. године, а дипломирао је 2011. године на модулу за Прехрамбено машинство, са средњом оценом 8,47. Дипломски рад, на тему „Пројектовање структуре и кинематике робота у линији за палетизирање картонских кутија са производима од чоколаде" кандидат је одбранио на Машинском факултету у Београду, оценом 10.

Школске 2011/2012. уписује Докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду. У школској 2011/12 био је ангажован као волонтер на одржавању вежби из предмета Хидраулички и пнеуматски механизми и инсталације и Основне технолошке операције у прехрамбеном машинству на трећој години основних академских студија. Од летњег семестра школске 2011/12 године ради као демонстратор-волонтер на предметима Конструктивна геометрија и графика и Инжењерска графика. Од 06.03.2014. запослен је као асистент за ужу научну област Теорија механизама и машина и Инжењерско цртање са нацртном геометријом на Машинском факултету Универзитета у Београду на предметима Конструктивна геометрија и графика и Инжењерска графика. Кандидат је положио све испите на Докторским Студијама са просечном оценом 10,00 (десет).

Користи се програмима из пакета Office као и програмима за просторно моделирање и конструисање уз помоћ рачунара: Solidworks, AutoCAD, Catia, Proengineer, Working model. Такође користи се програмским пакетом MatLAB као и програмима за генерисање Г-кода: Mach3, Aspire, OpenSCAM и ArtCAM. Течно говори енглески , а служи се немачким језиком.

Учествује у извођењу вежби на предметима на Машинском факултету Универзитета у Београду:

- Конструктивна геометрија и графика (од 2012. до 2017)
- Инжењерска графика (од 2012. до 2018.)
- Основне технолошке операције у прехрамбеном машинству (од 2012. до 2018.)
- Пројектовање механизама (2015. до 2017.)

Као аутор или коаутор 3 рада публикованих у међународним часописима категорије М23 и 7 радова публикованих на конференцијама категорије М33.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација Мише Стојићевића, маст. инж. маш., под називом „Нелинеарна динамика сатних механизама“ написана је на српском језику, садржи 210 страна формата А4, 79 слика, 15 табела, 318 математичких израза и списак коришћене литературе, који садржи 73 референци.

Дисертација садржи следећа поглавља:

- Увод
- Теорија мерења времена
- Теоријске основе пертурбационог рачуна
- Осцилатор
- Запречно-импулсни механизми
- Остали делови сата
- 3Д модел сатног механизма и симулација рада
- Закључак и
- Литература

Осим наведеног, дисертација садржи предговор, резиме на српском и енглеском језику, садржај, биографију аутора, изјаву о ауторству, изјаву о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и изјаву о коришћењу.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Докторска дисертација „Нелинеарна динамика сатних механизама“ је подељена у 9 целина: увод, 6 поглавља, закључак и летература.

Поглавље 1 „Увод“ даје увид у уводна разматрања и кратку анализу предмета истраживања докторске дисертације. Поред предмета истраживања ово поглавље се бави и научним методама и приказује у најкраћим цртама очекиване резултате ове дисертације према полазним хипотезама.

Поглавље 2 „Теорија мерења времена“ приказује кратак историјат мерења времена, закључно са савременим дефиницијама јединице за мереље времена. Приказано је како је човек препознао потребу да поседује информацију о времену још у праисторији, посматрајући циклусе Сунца и Месеца. Потом су прве цивилизације старог Египта и Месопотамије развијале календаре. Ови календари коришћени су за предвиђања датума

сезонских астрономских догађаја битних за успешно уређење државе и друштва. Ове цивилизације су дале прву поделу на шездесет делова која је остала и до данашњих дана (сат има 60 минута, минут има 60 секунди). Касније, цивилизације старе Грчке и Рима, унапређују методе и уређаје за мерење протока времена, тако да се јављају и први соларни и водени часовници. Средњи век бележи појаву првих примитивних механичких часовника које су правили монаси, од којих нам долазе и први записи о описима механичких сатова. У XVII веку почиње развој прецизног мерења протока времена и почиње ера трансформације – од часовника који су били толико велики да су могли само да буду смештени у торњевима до механизма који смањују сат тако да може да се носи на руци. На крају поглавља дат је преглед развоја јединице времена - од првих цивилизација (које су узимале дан као природну и основну јединицу) до савременог доба - где можемо секунду дефинисати преко периода зрачења у атому цезијума.

Поглавље 3, „Теоријске основе пертурбационог рачуна“, приказује сврху и смисао технике двоструке размере времена, који постају очигледни када се открије кључни недостатак методе регуларних пертурбација. Како је један од главних циљева ове дисертације управо анализа грешака запречно-импулсних механизама (ти поремећаји биће касније описани конкретним формулама за израчунавање промене хода часовника) намера је да се анализа спроведе коришћењем теорије пертурбација и то, између осталог, методом двоструке размере (скале) времена. Најпре ће у овој глави бити сажето објашњена суштина поменуте методе и зато ће бити демонстриран покушај да се методом регуларних пертурбација приближно реши линеарна диференцијална једначина другог реда са константним коефицијентима. После објашњења пертурбационе технике двоструке размере времена, објашњена је укратко и суштина методе Крилова и Богољубова. На тај начин, може се извршити контрола добијених резултата и евентуално упоредити обе методе и дати критички осврт на погодности и тешкоће њихових примена.

Поглавље 4, „Осцилатор“ представља опис првог од два најзначајнија подсклопа сатног механизма. Осцилатор може бити конструисан као физичко клатно или као балансни точак. Физичко клатно представља тело које се њише око тачке која се налази ван центра равнотеже, док је балансни точак масивно тело, обртно око непокретне осе, која пролази кроз његов центар масе и врши осцилације под дејством еластичног реституционог момента силе. Поред описа функционалности ове две изведбе осцилатора, дат је прорачун циркуларне грешке методом двоструког времена. Циркуларна грешка представља промену периода клатна која је проузрокована променом амплитуде. Ово поглавље даје увид и у поремећаје рада осцилатора, који се јављају као последица спољашњих утицаја, као што су: температура, аеростатички потисак, отпор и густина ваздуха. Утицај температуре се сматра најзначајнијим, а манифестује се преко ширења и скупљања материјала клатна и на тај утиче на периодичне осцилације. Аеростатички потисак, сагласно Архимедовом закону, умањује тежину клатна за тежину клатном истиснутог ваздуха. На физичко клатно часовника, изузев реституционе гравитационе силе, делује и сила отпора ваздуха, услед чега клатно губи енергију. Промена густине ваздуха, настала због промене притиска, влажности, и/или промене температуре ваздуха, има непосредан утицај на укупну енергију клатна које осцилује, остале енергетске параметре, па тако и на ход часовника. Она је, у суштини, проузрокована променом динамичког отпора који делује на тег клатна. Ове промене могу се сврстати као утицаји средине у којој се клатно креће и често се сматрају за ред нижим утицајима од температурне. Ово поглавље приказује математички модел утицаја аеростатичког потиска, као и математички модел отпора и густине ваздуха. Са развојем механичких часовника тако су се развијала и решења за компензације грешака осцилатора. Највише пажње је посвећено температурној компензацији и дат је прорачун и пример клатна које је температурно компензовано. Утицај ваздуха (отпор, густина и аеростатички потисак) су занемарљиви, мада код прецизних часовника (астрономских сатова, хронометара, квалитетних јавних и торањских часовника), ова грешка је уочљива и може да постане

недопустиво велика, у случају дуготрајних периода изразито високог или ниског атмосферског притиска. Зато је дат основни прорачун ове грешке и приказан је њен ред величине.

Поглавље 5, „Запречно-импулсни механизми“, представља кључни подсклоп сваког механичког часовника, јер он одржава и пребројава осцилације осцилатора и тако мери протицање времена. Својим функцијама овај механизам уноси поремећаје у осцилаторни процес тако да осцилације више нису сопствене, већ принудне са фреквенцом која је подложна промени. Дакле, сам процес мерења времена ремети тачност тог мерења. Појава да запречно-импулсни механизам мења период осциловања осцилатора, па самим тим и ход часовника, назива се грешком запречно импулсног механизма или кратко – грешком запречнице. У оквиру класификације приказане су три врсте запречно-импулсног механизма: котвени запречно-импулсни механизам са повратним трзајем, мирни запречно-импулсни механизам и слободан запречно-импулсни механизам. Употребом одговарајућих дијаграма моментних интеракција, квалитативно су приказане конструктивне и динамичке карактеристике запречница, са посебним осврtом на грешке периода осциловања које оне генеришу. Након класификације запречно-импулсних механизама, изведена је општа формула за грешку запречно–импулсних механизама и то применом пертурбационе методе двоструке размере (скале) времена. Такође је изведена општа формула за грешку запречно–импулсних механизама и то техником усредњавања по методи Крилова и Богољубова. У оба случаја разматрани су само они сатни механизми који садрже спиралне опруге са балансним точком као осцилатором, али потребно је нагласити да су резултати ових анализа универзално применљиви на све друге типове запречно–импулсних механизама, укључујући и оне који се уграђују у стационарне часовнике са клатном. Полази се од чињенице да балансни точак сатних механизама врши принудне пригушене осцилације, а претпоставља се да су пригушења последица вискозног момента силе који је сразмеран угаоној брзини осцилација. Приказује се идентичност свих апроксимативних решења и потпуна сагласност процене реда величине грешке апроксимације и реда величине временског интервала на коме те апроксимације важе по обе методе.

Поглавље 6, „Остали делови сата“, заокружује целу причу везану за подсклопове сата. Поглавље даје описе три преостала дела сата и то: ремонтоара, преносне групе и механизма за навијање. Ремонтоар представља механизам који се најчешће може видети код часовника у торњевима. Најважнија сврха овог механизма је да обезбеђује секундарни, уједначени и константни извор навијања за запречно-импулсни механизам и на тај начин обезбеђује тачност сата. Приказан је принцип рада ремонтоара као и његови основни делови и дати су параметри ремонтоара који ће бити коришћен у 7 поглављу, „Модел целог сата“. Преносна група представља групу зупчаника који су упарени да преносе погон у једном смеру, са тега окаченог на добош до запречно-импулсног механизма, и у другом смеру уједначене интервале запречно-импулсног механизма претвара у приказ секунди, минута и часова. Механизам за навијање је приказан као посебан подсклоп који је испреплетан са преносном групом. Приказом његових саставних делова, као и принципа навијања и одржавања момента сата заокружује се прича о свим подсклоповима сата који ће бити направљен као 3Д модел и на коме се тестирају математички модели дати у претходним поглављима.

Поглавље 7, „3Д модел сатног механизма и симулација рада“, даје приказ резултата који су провера тачности формула за грешке запречно-импулсних механизама у квазистационарном режиму осциловања балансног точка, изведене применом теорије пертурбационог рачуна. На почетку је направљен 3Д модел целог сата у апликацији SolidWorks и извршне процес симулације рада. Сат који је измоделиран је направљен као сат са клатном. Поред симулације његовог рада, извршена је и симулација часовника који уместо клатна користи балансну опругу. Код ове врсте часовника на самом почетку процеса симулација, извршено је мерење периода осциловања, односно фреквенце слободних

пригушених осцилација балансног точка који је уграђен у оба склопа осцилатора и запречнице (склоп балансног точка и слободне запречнице и склоп балансног точка и запречнице са повратним трзајем). Сви резултати приказани су табеларно. Ако се узму у обзир само динамичке карактеристике, сви запречно-импулсни механизми могу да се поделе у три велике групе: брадихрони, тахихрони и изохрони. Детаљном анализом квазистационарног режима осциловања осцилатора показан је и физикални узрок - грешке запречно-импулсних механизама нису последица линеарне теорије осцилација, већ управо нелинеарне динамике сатних механизам, која је у овој дисертацији математички обрађена методама пертурбационог рачуна.

Поглавље 8 „Закључак“ указује на значај добијених резултата истраживања и таксативно наводи главне научне доприносе ове дисертације. Поред тога дат је и осврт на полазне хипотезе, где је указано на који начин је свака полазна хипотеза доказана у овом раду, и дат је кратак приказ будућих истраживања везаних за дисертацију.

Поглавље 9 „Литература“ даје приказ коришћене литературе кроз 73 извора према редоследу појављивања у дисертацији.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

У последњој декади 21. века, савремена индустрија механичких часовника налази се у сталној и постојаној експанзији, упркос популарности кварцних часовника као главних кокурената механичким. После краткотрајног успона 70-их година двадесетог века, производња кварцних часовника данас је у стагнацији, док производња механичких сатова бележи годишњи раст од око 10%. Годишњи обим производње механичких часовника је огроман. Кина производи преко 1 милијарде, Јапан 700 хиљада, а Швајцарска око 300 хиљада ручних часовника сваке године. Сагласно тако великом обиму производње, непрекидно се врше и бројна научна истраживања у области хорологије и технологије сатних механизама са циљем даљег усавршавања постојећих техничких решења и перформанси механичких сатова. Поменућемо само нека. Године 1980. знаменити британски часовничар и хоролог Џорџ Данијелс (George Daniels) патентира нови, коаксијални запречно импулсни механизам који се, од 2000. године, после интензицних тестирања, уграђује у све ручне часовнике фирме Омега. Са карактеристикама хронометарске запречнице, Данијелсов механизам је успешно заменио Швајцарску полужну запрчницу у „Омега“ часовницима високих перформанси. Године 1987. Џим Арнфилд (Jim Anfield) патентира нову гравитациону слободну запречницу која има боље хоролошке карактеристике од чувене Денисонове (Denison) двоструке трокраке запречнице која се угађује у велике стационарне сатове. Бит Халдиман (Beat Haldimann) патентира 2000. године нови котвени слободни запречно-импулсни механизам који својим квалитетима надмашује слободну запречницу Лудвига Штрасера (Ludwig Strasser). Лудвиг Оекслин (Ludwig Oechslin) патентира 2001, 2003. и 2004. низ техничких решења, као и нову запречницу која се уграђује у ручне часовнике врхунских перформанси фирме Јулис Нарден (Ulysse Nardin). Године 2004., физичар и хоролог Пјер Женекванд (Pierre Genequand) почиње рад на новом запречно-импулсном механизму који је био крунисан 2014. године изградњом првог функционалног прототипа. Најављује се да ће, својим карактеристикама, Женекванд запречница довести до револуционарног побољшања перформанси сатних механизама, које се у блиској прошлости није могло ни замислити.

Истраживања на пољу нових материјала у областима хорологије и технологије сатних механизама такође су значајна и посебно плодна. Нове легуре инвар, елинвар, ниварокс и

берилијумска бронза настале су управо из потреба решавања проблема компензације топлотних дилатација осцилатора механичких часовника. Технолози фирме Омега конструисали су у првој деценији 21. века спиралну опругу балансног точка о монокристала силицијума, са изузетно повољним учинком на перформансе часовника. Прототип запречно–импулсни механизам Женекванд израђен је у целости сечењем монокристала силицијума, а врше се тестирања израде и других виталних делова часовника од поменутог материјала. Изложене чињенице потврђују актуелност и савременост ове докторске дисертације. Осим тога, компјутерске симулације и анализе кретања различитих сатних механизама који су спроведени у дисертацији такође доказују савременост тематике.

Оригиналност ове докторске дисертације сагледава се пре свега кроз оригиналност примењених метода и постигнутих резултата. Један од важних циљева ове дисертације представља извођење аналитичких формула за грешке запречно-импулсних механизама, којима се квантитативно одређује промена фреквенце сатног осцилатора услед његове интеракције са запречно-импулсним механизмом. Формуле су изведене оригиналном применом теорије пертурбација и то по методи Крилова и Богољубова, као и методи двоструке размере времена. Примена ових метода, као и добијене формуле оригинални су резултати ове докторске дисертације. Осим тога, провера добијених формула методама компјутерске симулације и анализе кретања модела осцилатора и карактеристичних запречно-импулсних механизама, такође су оригинална остварења овог доктората. Оригинално је и извођење формуле за циркуларну грешку клатна применом пертурбационе методе двоструке размере времена, која квантитативно одређује зависност периода осциловања клатна од амплитуде. Оригинално је и физикално тумачење порекла грешака запречно–импулсних механизама, као и квалитативни опис динамике поменутих механизама, а посебно запречне и импулсне функције употребом посебних дијаграма моментних интеракција. Докторска дисертација даје и оригиналне како аналитичке методе, тако и итеративне методе компјутерских симулација за компензацију топлотних дилатација осцилатора. Осим ових најважнијих остварења, дисертација даје оригинална објашњења бројних поремећаја равномерности хода сатних механизама, а посебно утицаја промене густине и отпора ваздуха на период осциловања клатна.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Списак литературе је дат у посебном поглављу. Прегледом листе коришћене литературе закључује се да је кандидат проучио доступну референтну литературу и да је своје циљеве истраживања дефинисао на њима. Литература обухвата научне радове, штампане у часописима или објављене на конференцијама, као и књиге из области: историјата мерења времена, нелинеарне динамике, пертурбационог рачуна, сатних механизама и симулација механичких система уз помоћ одговарајућег софтверског пакета за 3Д моделирање.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У докторској дисертацији примењене су следеће опште научне методе:

- методе диференцијалног и интегралног рачуна
- нумеричке методе
- методе компјутерског моделирања облика
- методе компјутерске симулације и анализе кретања

У поступку реализације научних резултата, у овој докторској дисертацији примењене су следеће посебне научне методе:

- метода пертурбационог рачуна - поступак усредњавања по методи Крилову и Богољубову
- метода пертурбационог рачуна – метода вишеструких скала односно размера времена
- метода компјутерске симулације „Event based motion study“ у апликацији SolidWorks.

Применом теорије пертурбација формулисане су релације за грешке запречно-импулсних механизама којима се квантитативно одређује промена фреквенце осцилатора сатног механизма услед његове интеракције са запречно-импулсним механизмом. Релације су изведене применом методе Крилова и Богољубова, као и методе двоструке размере времена. Оба поступка довела су до идентичних резултата, што је била прва провера коректности и адекватности примењених метода. Формуле су показале да промена фреквенце осцилатора настаје услед промене амплитуде, интензитета принудног момента и фазне разлике између угаоне брзине осцилатора и принудног момента силе којим запречно-импулсни механизам периодично делује на осцилатор. Осим тога, пертурбацином методом двоструке размере времена изведена је релација за циркуларну грашку клатна, која квантитативно одређује зависност периода осциловања клатна од амплитуде. Ови резултати не могу се добити применом линеарне теорије осцилација, већ су типична последица нелинеарне динамике, чиме се такође потврђује адекватност коришћења методе пертурбационог рачуна.

Применом компјутерске симулације и анализе кретања модела осцилатора у интеракцији са одговарајућим моделима запречно-импулсних механизама извршена је провера коректности аналитичких формула за грешке запречно-импулсних механизама. Коришћена је метода „Event based motion study“ у апликацији SolidWorks. Резултати симулације обрађени су нумеричким методама, који су потврдили исправност поменутих аналитичких формула. Такође, креиран је потпуно функционалан модел сатног механизма и компјутерском симулацијом демонстриран и проверен његов рад.

3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати остварени и овој докторској дисертацији могу имати двојаку примену: теоријску и практичну. Теоријска примена остварених резултата односи се на даља истраживања у областима нелинеарне динамике, теоријске механике, а посебно теорије сатних механизама. Формуле за грешке запречно-импулсних механизама, изведене пертурбационим рачуном у интегралном облику, могу се конкретизовати за сваки поједини тип запречно-импулсног механизма, како за стационарни, тако и за нестационарни режим осциловања сатног осцилатора. Теоријски прорачуни компензације топлотних дилатација клатна могу бити примењена за превазилажење сличних проблема топлотних дилатација и у другим областима прецизне механике, а посебно прецизних мерења. Методе пертурбациног рачуна, методе компјутерске симулације и анализе кретања, коришћене у овој дисертацији, могу бити примењене као примери и препоруке за решавање одговарајућих проблема и у другим областима теоријске механике и теорије механизама.

Практична применљивост остварених резултата односи се на примену остварених резултата у индустрији сатних механизама. Теоријске формуле изведене у овој дисертацији, физикална тумачења феномена нелинеарне динамике сатних механизама, као и презентирани резултати компјутерских симулација и анализе кретања осцилатора, могу да имају практичну примену у усавршавању постојећих запречно-импулсних механизама или конструисању нових који ће побољшати перформансе савремених механичких часовника.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Чланови комисије сматрају да је кандидат показао да има смисао и знање неопходно да самостално препозна и систематски решава научне и инжењерске проблеме, примењујући савремене методе теоријског и експерименталног карактера, да користи расположиву литературу и да успешно влада савременим истраживачким методама. Резултати докторске дисертације доказ су способности кандидата за самосталан научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни доприноси ове докторске дисертације се могу видети кроз:

- Дисертација доприноси бољем разумевању теорије пертурбација кроз њену примену на практичном примеру сатних механизама
- Коришћењем пертурбационих метода дат је допринос теоријској механици и теорији механизама
- Израдом функционалног 3Д модела на коме је могуће симулирати рад механизма у довољно реалним условима да се може направити јасно поређење са резултатима добијеним аналитичким формулама
- Коришћење напредних метода 3Д моделирања за инвентивно коришћење посебно дефинисаних итеративних процедура компјутерског моделирања осцилатора са циљем постизања компензације његових топлотних дилатација
- Коришћење посебних метода компјутерске симулације које се не заснивају на току времена као независној променљивој, већ на унапред дефинисаним догађајима односно, стањима механизма у току његовог рада (event based motion study).
- Резултати научних истраживања у овој докторској дисертацији значајни су за квалитативно и квантитативно разумевање нелинеарне динамике механизама часовника, па се зато могу користити као практичне препоруке за ефикаснији дизајн механичких часовника што доводи до тачнијег и прецизнијег мерења тока времена.
- Резултати ове дисертације могу бити искоришћени за дизајн подсклопова запречно-импулсних механизама и осцилатора, као најважнијих делова сатних механизама.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Докторска дисертација „Нелинеарна динамика сатних механизама“ посвећена је анализи свих оних феномена који битно ремете и нарушавају функционисање сатних механизама као линеарних динамичких система. Наиме, ако би се ови феномени и утицаји занемарили односно, искључили из анализе, рад сатног механизма би се математички описивао линеарном теоријом осцилација. Таква линеарна динамика није у стању да, ни квалитативно нити квантитативно, дефинише узрок било какве промене равномерности хода часовника, па самим тим ни методе за корекцију такве промене. Сагласно томе, значај постигнутих резултата у овој дисертацији непосредно происходи управо из проучавања и анализе рада сатних механизама као нелинеарних динамичких система.

Значај резултата добијених у овој докторској дисертацији се огледа у томе што они могу да послуже као основа за даља научна истраживања и развоју нових метода научно-истраживачког рада. у истраживањима из области нелинеарне динамике као и из области проучавања сатних механизама. Као предлози за будућа истраживања из области докторске дисертације могу се издвојити:

- Израда функционалних 3Д модела свих најважнијих типова запречно импулсних механизама (котвена запречница са повратним трзајем, Харисонов грасхопер, Грејемова мирна запречница, Денисонова гравитациона, слободна полужна Швајцарска и Енглеска запречница и хронометарски запречно импулсни механизам)
- Симулације рада и анализе кретања свих горе наведених типова запречно - импулсних механизама са циљем откривања и дефинисања њихових карактеристичних импулсних функција. Дефинисање функционалне зависности момента силе којим запречно – импулсни механизам делује на осцилатор од угаоног померања осцилатора и фазе осциловања.
- Експерименталне провере могућности барометарске компензације односно компензације утицаја промене густине ваздуха на период осциловања осцилатора. Откривање и дефинисање утицаја вискозног и динамичког отпора (отпора притиска) на енергетске губитке осцилатора
- Компјутерска симулација рада епицикличног механизма за навијање часовника
- Експерименталне провере и провере компјутерским симулацијама утицаја нелинеарних карактеристика спиралне опруге на период осциловања балансног точка
- Теоријска анализа, експерименталне провере и провере компјутерским симулацијама грешака запречно–импулсних механизама у нестационарним режимима осциловања осцилатора.

4.3. Верификација научних доприноса

Део доприноса дисертације је верификован је кроз 2 рада у међународним часописима категорије М23 и 2 рада на међународним конференцијама категорије М33 на којима је кандидат аутор или коаутор.

Категорија М23:

1. **Stojicevic M.,** Jeli, Z., Stoimenov M.: A Bipedal Mechanical Walker with Balancing Mechanism - *Tehnički vjesnik/Technical Gazette* 25(1), pp. 118-124, 2018 **(IF=0.7230)** (ISSN 1330-3651)

2. Popkonstantinovic B., Obradovic R., Obradovic M., Jeli Z., **Stojicevic M**.: Geometrical and mechanical characteristics of deformed balance spring obtained by simulation study,- *Simulation* 92(11), pp. 981-997, 2016, **(IF=0.64)** , (ISSN 0037-5497)

Категорија М33:

1. Popkonstantinović B., Miladinović Lj., Obradović M., **Stojićević M.**: Geometrical characteristics and solid modeling of the grasshopper escapement mechanism, - *Proceedings of the 4th International Scientific Conference on Geometry and Graphics moNGeometrija*, Vlasina 2014., pp 173-181.

2. Popkonstantinović B., Miladinović Lj., Jeli Z., **Stojićević M.**: Event based motion analysis of escapement mechanism 3d model, - *Proceedings of the 5th International Scientific Conference on Geometry and Graphics moNGeometrija*, Belgrade 2016., pp 186-193.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу прегледа и детаљне анализе докторске дисертације под називом „Нелинеарна динамика сатних механизама“ кандидата Мише Стојићевића, маст. инж. маш., Комисија за оцену и одбрану констатује да је урађена докторска дисертација написана према свим стандардима у научноистраживачком раду, као и да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању, стандардима и Статутом Машинског факултета, Универзитета у Београду.

На основу резултата и закључака приказаних у докторској дисертацији и чињенице да је анализирана проблематика значајна и актуелна у стручној и научној јавности, констатује се да је кандидат Миша Стојићевић, маст. инж. маш., успешно завршио докторску дисертацију у складу са предвиђеним предметом и постављеним циљевима истраживања.

Кандидат је остварио оригиналне резултате у оквиру докторске дисертације, користећи при томе адекватну расположиву литературу и резултате сопственог истраживања. Научна и стручна јавност је упозната са резултатима истраживања кроз 2 рада која су публикована у међународним часописима (категорија М23) и 2 рада публикована на међународним конференцијама (категорија М33).

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације закључила је да дисертација представља оригинални научни рад са научним доприносом у области техничких наука, ужа научна област Теорија механизама и машина и инжењерско цртање са нацртном геометријом, па сагласно томе предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Београду да прихвати Реферат Комисије, а дисертацију „Нелинеарна динамика сатних механизама“ кандидата Мише Стојићевића, маст. инж. маш., стави на увид јавности и извештај упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, а да након тога кандидата позове на јавну одбрану.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

_____

редовни проф. др Бранислав Попконстантиновић
Универзитет у Београду – Машински факултет

_____

редовни проф. др Љубомир Миладиновић
Универзитет у Београду – Машински факултет

_____

редовни проф. др Драган Петровић
Универзитет у Београду – Машински факултет

_____

доцент др Зорана Јели
Универзитет у Београду – Машински факултет

_____

редовни проф. др Ратко Обрадовић
Универзитет у Новом Саду – Факултет техничких наука

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број:456/5
Датум: 15.03.2018. године
Београд, Краљице Марије бр. 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 63. Статута Машинског факултета (број 1876/1 од 04.10.2013. године) и члана 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета, Наставно-научно веће на седници одржаној 15.03.2018. године, донело је

О Д Л У К У

Усваја се реферат Комисије о урађеној докторској дисертацији „**НЕЛИНЕАРНА ДИНАМИКА САТНИХ МЕХАНИЗАМА**“ студента **МИШЕ СТОЈИЋЕВИЋА**, маст. инж. маш.

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

Универзитет у Београду је својом Одлуком број 61206-3093/2-17, од 28.08.2017. године, дао сагласност на предлог теме докторске дисертације.

Објављени радови студента у часописима међународног значаја:

Категорија М23:

1. **Stojicevic M.,** Jeli, Z., Stoimenov M.: A Bipedal Mechanical Walker with Balancing Mechanism - *Tehnički vjesnik/Technical Gazette* 25(1), pp. 118-124, 2018 **(IF=0.7230)** (ISSN 1330-3651)

2. Popkonstantinovic B., Obradovic R., Obradovic M., Jeli Z., **Stojicevic M**.: Geometrical and mechanical characteristics of deformed balance spring obtained by simulation study,- *Simulation* 92(11), pp. 981-997, 2016, **(IF=0.64)** , (ISSN 0037-5497)

Одлуку доставити: студенту, ментору, Катедри за Теорију механизама и машина и архиви Факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Радивоје Митровић