

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији
кандидата мр **Александра Сићовића**, дипл. инж. маш.

Одлуком бр. 1283/2 од 09.07.2015. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр **Александра Сићовића**, дипл. инж. маш. под насловом:

УПОРЕДНА ДИНАМИЧКА АНАЛИЗА ПОСЕБНИХ ТИПОВА РАЗМЕЊИВАЧА ТОПЛОТЕ

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 мр **Александар Сићовић**, дипл. инж. маш, пријавио је израду докторске дисертације 09. јануара 2017. године, под бр. 31/1, Катедри за аутоматско управљање Машинског факултета Универзитета у Београду и за ментора предложио редовног професора др **Драгутина Љ. Дебељковића**.

На основу пријаве кандидата и предлога Катедре за аутоамтско управљање, заведене 14.02. 2007. год., под бројем 31/2, и обвештења са седнице Наставно- научног већа одржане 26.01.2017. год., именована је Комисија за оцену подобности теме и кандидата у саставу: ментор, проф. др Драгутин Љ. Дебељковић, проф. др Бранислав Јаћимовић, проф. др Франц Коси, проф. др Асим Садибашић, Технолошко-металуршки факултет Београд и коментор ванр. проф. др Винцент Бутала, Машински факултет Љубљана.

Комисија је 14. фебруара 2007. год., дописом бр. 31/3, известила Наставно-научно веће Машинског факултета Универзитета у Београду да кандидат испуњава све услове предвиђене законом и Статутом Машинског факултета Универзитета у Београду за израду докторске дисертације и да предложена тема под радним називом „**Упоредна динамичка анализа посебних типова размењивача топлоте**“ може бити предмет докторске дисертације.

Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду на седници 22. 02. 2007. год. донело је одлуку **бр. 31/4**, да се прихвата предлог о испуњености услова и о научној заснованости теме докторске дисертације „**Упоредна динамичка анализа посебних типова размењивача топлоте**“ кандидата **мр Александара Сићовића**, дипл. инж. маш. и да се за ментора именује проф. др **Драгутина Љ. Дебељковића**, а за коментора ванр. проф. др Винцент Буталу, са Машинског факултета из Љубљане.

Та одлука је достављена Стручном већу Универзитета у Београду за машинске, саобраћајне и организационе науке у Београду на сагласност.

Стручно веће Универзитета у Београду за машинске, саобраћајне и организационе науке, на својој седници одржаној 10.04.2007. год., дало је сагласност, **одлука бр. 43/3** на предлог теме докторске дисертације „**Упоредна динамичка анализа посебних типова размењивача топлоте**“ кандидата **мр Александара Сићовића**, дипл. инж. маш., под менторством редовног професора др **Драгутина Љ. Дебељковића** и коменторства ванр. проф. др Винцент Бутале, Машински факултет Љубљана.

На основу одлуке Наставно-научног већа Машинског факултета о испуњености услова кандидата за израду докторске дисертације и именовању ментора и сагласности Стручно веће Универзитета у Београду за машинске, саобраћајне и организационе науке, декан Машинског факултета у Београду је 07.05.2007. год. донео Закључак бр. 541/1 да се одобри рад на теми докторске дисертације „**Упоредна динамичка анализа посебних типова размењивача топлоте**“ кандидату **мр Александару Сићовићу**, дипл. инж. маш.

У вези sukcesивних захтева кандидата **мр Александара Сићовић**, дипл. инж. маш. и сагласности Катере за аутоматско управљање и ментора докторске дисертације проф. др Драгутина Љ. Дебељковић, Наставно- научно веће Машинског факултета у Београду, сагласно чл. 128 Закона о високом образовању, својим одлукама: бр. 300/2 од 01.03.2012, бр. 586/2 од 21.03.2013, бр. 810/2 од 24. 04. 2014. год. и бр. 333/3 од 05.03. 2015. год., одобрило продужење за израду докторске дисертације под називом: „**Упоредна динамичка анализа посебних типова размењивача топлоте**“ кандидату **мр Александару Сићовићу**, дипл. инж. маш., а са до 11. 04. 2016. год., као коначним датумом за одбрану докторске дисертације.

Дописом бр. 810/3 од 28. новембра 2014. год. ментор проф. др Драгутин Љ. Дебељковић обавестио је Катедру за аутоматско управљање Београду да је кандидат **мр Александар Сићовић**, дипл. инж. маш завршио своју докторску дисертацију и предложио Комисију за преглед и оцену докторске дисертације.

Сагласно предлогу ментора Катедра за аутоматско управљање је својим дописом, бр. 1283/1 од 29. јуна 2015. год. Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду предложила Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у саставу: ментор др Драгутин Љ. Дебељковић, др Момчило Милиновић, проф., др Цветко Црнојевић, проф., др Владимир Стевановић, проф. и ванредни проф. др Томислав Шекара, ЕТФ Београд.

На седници Наставно-научног већа одржаној 09.07.2015. године је једногласно усвојено обавештење о завршетку дисертације кандидата **мр Александара Сићовића** дипл. инж. маш. као и предлог састава Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације, а све то Одлуком бр. 1283/2 од 09.07.2015. године.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација припада области Техничких наука, научна област Машинство и ужа научна област Аутоматско управљање.

За ментора је одређен проф. др Драгутин Љ. **Дебељковић**.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Кандидат мр **Александар Сићовић** дипл. инж. маш., рођен је 1971/03/17. у Београду.

Основну и средњу «Архитектонско-техничку» школу завршио је у Београду.

Дипломирао је на Машинском факултету у Приштини 1998. год., одбранивши дипломски рад под називом: «Динамика система са чистим временским кашњењем», код ментора Др Д.Љ. Дебељковић, проф.

Магистарску тезу под називом: »Динамичка анализа процеса са расподељене параметрима - математичко моделирање и симулација котловских испаривача», одбранио је на одсеку за термотехнику Машинског факултета Универзитета у Београду а код ментора Др Драгутина Љ. Дебељковић, проф.

По завршетку студија запослио се у Компанији «Универзал -Унитех» Београд, на пословима пројектовања, сервисирања и продаје компресорске технике (1998 - 2004) а касније као дипломирани инжењер на пословима пројектовања и одржавања термоенергетских постројења «Термоелектро - АД» Београд (2004 - 2006).

Од 2007 год., па све до недавно радио је у «Ле-техника» Крањ (Словенија) у сектору за развој криогене технике.

Објавио је један рад са SCI листе и један коауторски рад у часопису националног значаја.

Учествовао је и презентовао један рад на конференцији међународног значаја а 3 (три) рада на конференцијама националног значаја.

Са својим ментором, објавио је 5 (пет) монографије националног значаја са тематиком посвећеном моделирању индустријских процеса а посебно размењивача топлоте.

Течно говори енглески а служим се немачким језиком.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација „**Упоредна динамичка анализа посебних типова размењивача топлоте**“, кандидата мр **Александар Сићовић** дипл. инж. маш, изложена је на 194 стране.

Дисертација садржи следећих дванаест поглавља:

Предговор,

Увод,

1. Теоријске основе инфрацрвених сензора и детектора,
2. Основи теорије размене топлоте и масе код идеалних и реалних гасова и Џул-Томсонов ефекат,
3. Размењивачи топлоте.
Основни принципи хлађења детектора употребом Деварове посуде и конструкциона шема Џул-Томсоновог мини-хладњака
4. Термодинамичке и гасодинамичке карактеристике криогених система
5. Одабрани термодинамички и циклусни модел Џул-Томсоновог мини-хладњака са фиксним извором и ограниченим масеним капацитетом расхладног флуида,
6. Одабрана шема Џул-Томсоновог мини хладњака за хлађење ИС детектора на задатом временском интервалу.
7. Динамика криогеног размењивача топлоте као објекта управљања
8. Могући избор концепта управљања у примени на објекте управљања при разматрању различитих типова **хладњака**

9. Линеарна анализа сложеног регулатора,
10. Експериментално испитивање рада система у затвореном колу дејства
11. Анализа различитих типова испаравања и дискусија начина регулације
12. Закључак, доприноси и правци даљих истраживања.

Прилози
Литература

Дисертација садржи списак од 104 коришћене референце и цитиране литературе на 8 страна. Дисертација има укупно 104 слика и 20 табела.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Кандидат своје излагање започиње Предговором у коме објашњава настанак рада и изражава захвалност свима који су допринели изради докторске дисертације, што је уобичајена пракса у писању научног рада у свету.

Анализа и пројектовање савремених система аутоматског управљања, на данашњем степену развоја науке и технике, као и неопходност испуњавања веома строгих захтева који се намећу квалитету динамичког понашања система у целини, траже познавање њихових довољно тачних, у инжињерско-техничком смислу, математичких модела.

За њихово формирање од фундаменталног је значаја суштинско познавање процеса који се моделира, прецизно дефинисање "контролне границе", потпуно разграничење питања примарних и секундарних утицаја, као и коректно исписивање одговарајућих билансних једначина за неуравнотежена стања процеса.

Преостали део посла око свођења математичког модела на свој коначан облик, обично представља рутински задатак.

Ако се претпостави да математички модели довољно тачно описују физичке системе и да дају њихов веродостојан опис, тада они садрже све информације о особинама тих система и у тој форми пружају могућност да се применом одговарајућих метода и поступака, кроз анализу и синтезу, утврде њихове објективне особине или пројектују нове управљачке целине сходно постављеним захтевима или усвојеним критеријумима.

Према томе, а имајући у виду претходно речено, основна преокупација аутора ове дисертације била су посвећена проблематици математичког моделирања специјалних класа криогених размењивача топлоте као објеката и процеса аутоматског управљања, данас веома распрострањених и заступљених посебно у војној индустрији и енергетици а и шире у свим гранама индустрије. Анализа њиховог динамичког понашања и синтезе управљачких система за постављене веома строге и опрећне захтеве били су у жижи интересовања аутора.

Симулационим поступцима верификовани су изведени резултати и поређени са експериментално добијеним резултатима,

У том смислу кандидат се осврће и на још нека значајна питања, везана за ову класу објеката аутоматског управљања, стављајући акценат на проблеме њихове конструкције и извођења сходно постављеним захтевима, њиховог понашања у режимима када им је обезбеђена подршка управљачког система а и у режимима када то није случај (рад нерегулисаног објекта), незаобилазна питања њихове експлоатације и разматрања која треба да одреде врсту реалног флуида који ће обезбедити ефикасно хлађење. Значајан простор посвећен је указивању на чињеницу да је неопходно посебно анализирати шири спектар теоријских питања општих и посебних закона термо и гасодинамике како бе се прецизно установили услови који би се применили баш у разматрањима оваквих специјалних мини **расхлађивача**.

Сва ова питања била су предмет излагања у уводном делу.

У првом поглављу износе се теоријске основе инфрацрвених сензора и детектора и у том смислу кандидат, посебну пажњу обраћа на проблеме детекције и рада детектора, на свремене принципе њиховог рада, основне карактеристике и поделе као и на нека питања њихове осетљивости, брзине и времена реаговања, енергијске резолуције и ефикасности.

У наставку тих излагања, разматрају се питања разлога и принципа хлађења детектора, као незаобилазног услова њиховог ефикасног деловања.

У другом поглављу дисертације износи се рекапитулација основних теоријских резултата везаних за размену топлоте и масе код идеалних и реалних гасова, као и детаљан опис Џул-Томсоновог ефекта. Излаже се Мајерова једначина идеалног и реалног гаса, Џул-Томсонов ефекат, разматрају се термодинамички услови за обезбеђење поменутог ефекта, адијабатски процеси код реалних флуида и адијабатско-изенталпско истицање гаса кроз конвергентни млазник. Посебна пажња посвећена је питањима структуре двофазног тока, проточним карактеристикама струјања мешавине течност-пара и њиховим реалним особинама а све са циљем детаљног упозавања са динамиком двофазних струјања. Поглавље се завршава ригурозном анализом феномена адијабатско-изенталпског истицања кроз конвергентни млазник, као једним од фундаменталних питања рада овде разматраног криогеног размењивача топлоте.

У првом делу трећег поглавља, кандидат износи краћу рекапитулацију знања везаних за свремене размењиваче топлоте, износи могуће поделе према начину рада, конструкцији, начину преноса топлоте, типу температурског поља, температурском радном режиму, смеру струјања радних флуида, присутној расподељености параметара процеса, начину избора улазних и излазних величина као и величина стања процеса, тако и према намени. Посебно место у овим излагањима имају криогени размењивачи топлоте, њихове могуће конструкције, класификације, принципи рада, итд. Излажу се, елементарне особине цевастих, Жак - Хампсонових, плочасто - оребрених и перфорираних криогених размењивача топлоте. У наставку их излагања, у жижи интересовања су и питања њихове конструкције и дискусија предности и недостатака у односу на неке друге, а све са аспекта значајног за даља истраживања и конкретан избор истог.

Приказана је и детаљно објашњена термодинамичка шема будуће разматраног мини-хладњака као и његова позиција интегрисана у Деварову посуду. Дат је целовит опис рада хладњака унутар овог склопа, пропраћен низом симболичко-функционалних шема, које употпуњују излагања и чине их јасним, до перфекције.

Посебан одељак разматра различите могућности система хлађења, који су актуелни у савременој пракси, а све пропраћено аутентичним фотографијама различитих изведби.

Термодинамичке и гасодинамичке карактеристике криогених система, била су окосница суштинских разматрања у четвртном поглављу. Разматрају се термодинамичка својства криогених флуида и услови рада Џул-Томсоновог мини-хладњака.

Да би се, касније, јасно апострофирали сопствени и оригинални доприноси аутора ове дисертације, у наставку излагања износи се, детаљно, преглед до сада постигнутих резултата на пољу изучавања моделирања, динамике и рада криогених размењивача топлоте, а све то кроз систематски и хронолошки приказ доприноса реномираних научника, који су те своје резултате саопштили у респектабилним научним часописима.

Пето поглавље носи сва обележја термодинамичког прилаза разматрању усвојеног циклусног модела Џул – Томсоновог мини – хладњака са фиксним извором напајања и ограниченим масеним капацитетом расхладног флуида.

У склопу тих излагања, разматрају се различити начини рада Џул- Томсоновог мини хладњака, а кроз излагања која тангирају следеће опције: мини - хладњак са отвореним циклусом без управљања, мини – хладњак са двоструким циклусом, мини – хладњак са континуално управљаним циклусом и коначно мини – хладњак са дискретно управљаним циклусом. За све ове категорије могућег рада мини – хладњака, дат је целовит опис процеса рада, а што је све пропраћено изванредним симболичко – функционалним шемама, које употпуњују разумевање тамо изложене материје а у неким приликама и аутентичним фотографијама, које употпуњују представу свеопшта, усвојена сазнања о њиховм реалном изгледу и габаритима, што није од тако малог значаја.

У шестом поглаљу разматра се изабрани Џул – Томсонов мини – хладњак за потребе хлађења ИС детектора на задатом временском интервалу. У предворју ових разматрања излажу се неопходне рекапитујације неких термодинамичких законитости, везаних за прелаз топлоте у условима са или без фазне трансформације, мехаурасто као и филмско испаравање, а све у специфичним условима хлађења. Због, касније насušних потреба за исписивањем основних закона конзервације и њихове конкретне примне на разматрани криогени размењивач топлоте, рекапитулирају се основна знања везана за питања општег струјања и размене топлоте у цевима размењивача, питања утицаја трења и размене топлоте при струјању невискозног флуида, као и једно од најзначајнијих проблема скопчано са изотермским струјањем у цевима са присутним и незаобилазним трењем. Свему томе додају се и разматрају основне билансне једначине, оличене у једначинама о одржању масе, енергије и импулса, као базичним једначинама модела, које се нужно проширују допунским једначинама како би се оформио затворени систем диференцијалних једначина (обичних или парцијалних) погодан за аналитичко или нумеричко решавање.

Термодинамичком сегментном шемом, кандидат, је успео да дочара сктруктуру криогеног размењивача наспрам конструкцијског извођења и тракта расхладног флуида и присутне околине.

Мимо тога, са становишта аутоматско управљања, предочен је упечатљив условни структурни дијаграм, који сликовито приказује целокупни криогени размењивач топлоте веома детаљно, сходно конструкцијском извођењу, али са присутним улазно- излазним и редудантним сигнаlima, који инервирају и побуђују поједине секције (подсистеме) овог нерегулисаног објекта управљања.

Један од базичних доприноса ове дисертације излаже се у наставку.

Наиме, на бази раније формиране контролне границе сваке појединачне секције криогеног размењивача, усвојених и китички размотрених претпоставки којима је дефинисао модел објекта, кандидат је редом за сваку секцију поставио неопходне билансне једначине за њихов рад у нестационарним радним режимима, додавајући при томе и изванредан број допунских, алгебарских једначина, затварајући тиме систем диференцијалних једначина.

Лако се уочава да је кандидат врстан познавалац разматраног процеса, а што је проистекло из његовог догодишњег практичног бављења расхладном техником и што је а priori одредило да овај, иначе веома сложен процес, разматра са становишта процеса са усредсређеним параметара уместо расподељеним, што више одговара стварности али би повукао и непремостиве тешкоће у каснијој нумеричкој симулацији процеса. Ово одређење и бежање од академског модела, показаће се касније као потпуно исправно у егзактној верификацији математичког модела, његовој симулацији и поређењу тих резулата са експериментално прикупљеним подацима о реалном понашању разматраног нерегулисаног или регулисаног објекта.

У контексту ових излагања ваља напоменути да су постављени засебни математички модели : извора напајања – боце под притиском, високо притисног тока, млазнице, коморе, детектора и коначно ниско проточног тока.

У зависности од потребних сазнања о динамичком понашању појединих секција, селективно су коришћене једначине о одржању масе, о одржању енергије и кад кад једначине импулса, односно момента количине кретања, а све са становишта потреба и праксе аутоматског управљања.

У примени појединих овде коришћених формула, појавиле су се и неке које су представљале оригиналне доприносе аутора, базиране на његовим сопственим искуствима и дубоког познавања струјних и термодинамичких својстава расхладних флуида и њихових понашања у једнофазном и двофазном току.

Седмо поглавље финализује резултате претходног поглавља формирајући математички модел разматраног процеса као целине. Да би заинтересованом читаоцу и ова етапа била јасно, кандидат у краћој рекапитулацији износи детаље везане за поступак и процедуру математичког моделирања, са посебним освртом на струјне и струјно-термичке процесе као окоснице рада овде разматраних криогених размењивача топлоте, да би све то окончао приказом динамике појединих секција у виду система диференцијалних једначина једанаестог реда, са припадајућим почетним условима а све то у релативним одступањима након ивођења Лапуновљевих трансформација координата, чиме су створе предуслови за бездимензионо формирање и исписивање диференцијалних једначина процеса а све са мотивацијом да се избором управљачких, поремећајни и излазних величина, као и величина стања створе предуслови за прелазак у модел у простор стања, као једну од најсавршенијих презентација динамике разматраног процеса, оличене у векторској диференцијалној једначини стања и једначини излаза, окарактерисаних системским матрицама и релевантним величинама процеса.

Детаљи свођења нелинеарног на линеаризовани модел, као и одређивање конкретних вредности коефицијената у диференцијалним једначинама понашања а све за један конкретно усвојени номинални радни режим, дати су у додацима, како не би оваква извођења оптерећивала основни текст.

На основу математичког модела процеса, датог у простору стања, користећи савремене технике симулације (MATLAB programi) одређени су одскочни одзиви релативне промене температуре детектора на његовом излазу, при јединичним одскочним промена свих управљачких и поремећајних величина. Дата је и графичка илустрација ових резултата која више него добро кореспондира са актуелним понашањем овде разматраног криогеног размењивача топлоте, сл. 9.2, *крива 1*, чиме је потврђена аутентичност (један од значајних доприноса рада) и веродостојност формираног математичког модела.

Савремени могући концепти управљања предметним хладњаком, били су предмет разматрања у **осмом** поглављу. Ослањајући се на класичне удџбенике, кандидат је дао актуелни преглед савремених концепата управљања, апострофирајући и претпостављајући значај управљања у затвореном колу дејства (затворени системи, системи са повратном спрегом, системи регулисања) над управљањем које би се одвијало у отвореном колу дејства, чак и у случајевима концепта са директном компензацијом поремећаја. Тим излагањима придодат је и концепт управљања у затвореном колу дејства са индиректном компензацијом поремећаја а са амплитудно-фреквентним управљањем, које обезбеђује посебан преносни орган редно укључен у главну грану система у затвореном колу дејства, познат под називом **PWM** – ширински модуо. Овај концепт управљања је незаобилазан када су у питању криогени размењивачи топлоте који су били предмет овдашњих разматрања, имајући у виду све њихове специфичности и екстремне захтеве, у погледу дозвољених толеранција (граница) у којима треба одржавати вредност регулисане вредности – температуре детектора на излазу. Могући концепти, завршавају се приказом комбинованог концепта управљања, где се одвија и директна и индиректна компензација поремећаја, а који у овим излагањима није био од посебног интереса. Излагања су пропраћена одговарајућим структурним дијаграмима, како би се извршила визуелизација постојећих концепата **управљања**.

Девето поглавље бави се линеарном анализом сложених регулатора, неопходних за успешну реализацију строго постављених задатака криогеног размењивача топлоте, првенствено усмерених ка одржавању ниских температура на излазу детектора.

Имајући у виду сву сложеност математичког модела нерегулсаног објекта (криогени размењивач без придруженог управљачког система), посебно у смислу његове инхерентне нестабилности а посебно чињенице превисоког реда модела, кандидат се, имјаући у виду крајњи циљ синтезе управљања, определио за редукцију реда модела, што данас представља рутински задатак, ако се таква редукција може обавити. Користећи методу која се ослања на функције осетљивости и концепт робусности а утемељена на концепту доминантних полова система, кандидат своди свој модел са једанаестог реда на трећи ред, констатујући да је и овај модел нестабилан а и неминимално фазни.

Све то није препрека да се синтетизује, познатом методом, сложени регулатор, доиста на граници физичке остварљивости али и каузалан у извесном смислу, тако да применом одговарајућег програмског пакета (MATHLAB), резултује коначно и његова тражена преносна функција која не показује ништа друго већ да је у поступку добијен класичан ПИД регулатор, који изискује додатни преносни орган познате преносне функције у предворју сигнала који изражава жељену вредност температуре детектора на излазу. Ваља напоменути, да су у поступку синтезе регулатора одређени и сви његови параметри. Користећи алгебру блок дијаграма, формира се структура која је уобичајена у теорији и пракси аутоматског управљања. Аналитичка извођења пропраћена су сјајном визуелизацијом, кроз детаљне блок дијаграме у свим фазама извођења, па све до коначног решења. Ова излагања завршавају се формирањем целокупног блок дијаграма система у затвореном колу дејства и одскочним одзивом, за нулте почетне услове система, који приказује прелазни процес који се одиграва на излазу детектора проузрокован само одскочном променом пормећаја – напојног притиска боце.

У наставку се излажу теоријске основе дискетног (импулсног) управљања, познатог у литератури као ширинска модулација, као и пропратни снимљени дијаграми за два случаја таквог регулисања оличени у случај константне амплитуде и случај са промењивом амплитудом. У конкретном случају објашњава се поступак управљања са имулсним регулатором протока радног флуида. Приказани су дијаграми ширинско импулсне модулације и последични дијаграм који илуструје тај ефекат у виду градијента промене температуре детектора на излазу. Као кључни део који реализује импулсно управљање приказана је и промена времена отворености и затворености млазнице током процеса трајања флађенја.

Детаљи експерименталног испитивања криогеног размењивача топлоте, у склопу рада система у затвореном колу дејства, били су предмет разматрања и проучавања у десетом поглављу. Неопходност ових разматрања је више него евидентна јер иста воде нужно до спознаје рада овог размењивача у реалним условима и свим његовим специфичностима а више од тога пружају могућност да се снимањем одговарајућег динамичког понашања, као и понашања у устаљеним (стационарним и периодичним) радним режимима покаже или не сагласје резултата успостављених аналитичким прилазима (моделирање - симулација) и резултата проистеклих из непосредних мерења, овог пута усмерених на снимање одговарајући комплементарних одзива реалног објекта, било нерегулисаног, било спрегнутог у жељену конфигурацију система у концепту управљања са повратном спрегом и индиректном компензацијом поремећаја.

У наставку кандидат даје непосредни увид у апаратуру и саму експерименталну процедуру примењену на криогени размењивач топлоте а све са циљем да се што боље објасне услови под којим је спроведен експеримент прикупљања података и начин њихове визуелизације, а све сагласно различитим расположивим регулаторима, као и фундаментални приказ понашања нерегулисаног објекта.

У једанаестом поглављу кандидат излаже једну интересантну дискусију везану за могућност појаве принудне или природне у зони детектора, а што зависи од износа Рејнолдсовог броја а све везано за процес регулисања температуре у зони детектора масеним протоком или само масом расхладног флуида, следствено. У том смислу кандидат показује да је за успешан процес регулисања температуре од круцијног значаја време отворености млазнице и односа гасне и течне фазе у зони детектора. Као резултат ових разматрања проистекао је један упечатљив дијаграм (номограм) који успоставља везу између карактеристичног времена млазнице и времена трајања процеса хлађења у функцији криве времена затворености млазнице и криве стварног пражњења. Пресеком ових кривих одређена је граница могућности примене импулсне регулације.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

„Упоредна динамичка анализа посебних типова размењивача топлоте“, кандидата мр **Александар Сићовић** дипл. инж. маш. представља савремен и оригиналан приступ и допринос актуелним методама проучавања динамичког понашања криогених размењивача топлоте за потребе војне индустрије. Ово је посебно значајно када се има у виду, да је по питању ове проблематике објављен релативно мали број научних радова, да су резултати конкретних експерименталних испитивања практично недоступни, али и да је добро познато да садашње перформансе тих уређаја још увек не могу да, у широком спектру, задовоље све постављене захтеве, што је и била основна мотивација и преокупација аутора ове докторске дисертације у овим истраживањима. Полазећи од сопственог и оригиналног математичког модела процеса струјања у криогеном размењивачу топлоте, а спроводећи компаративану анализу, утемељену на аналитичком прилазу, а касније потврђену експерименталним резултатима, које је спровео кандидат, јасно је указано на евидентна побољшања рада разматраног криогеног размењивача топлоте што оправдава сва настојања да се до таквих резултата и дође.

Оригиналност у приступу решавања проблема и добијених резултата у оквиру дисертације потврђује рад публикован у реномираном часопису. Дисертација се може оценити веома успешном, узевши у обзир да су анализе, критичке дискусије и добијени резултати били пропраћени зрелим научним и инжењерским закључцима са сагледаним правцима даљих истраживања.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У докторској дисертацији је коришћена врло обимна литература из области криогене технике.

У том смислу цитирани су радови које се односе на перформансе Цул-Томсоновог хладњака, на математичко моделирање ове класе размењивача топлоте, поступке за нумеричку симулацију динамике мини-хладњака, класичне и савремене типове њихове регулације, карактеристике инфра црвених сензора и детектора уопште, проблеме везане за дефинисање параметра двофазних мешавина, различита њихова конструкцијска извођења, итд.

Литература је кандидату послужила као полазна основа за формирање прегледа досадашњих истраживања у предметној области а касније, поредбено, за устостављање јасне слике о сопственим доприносима у односу на постојеће.

На тај начин, дат је релевантан приказ постојећег стања у домену коме припадају проблеми разматрани у докторској дисертацији.

Коришћена литература има карактер научног, савременог и актуелног извора информација, а осим прегледа постигнутих резултата, указује на могуће правце даљег научно-истраживачког рада у тој области.

Наведени радови, проширени су и извесним бројем монографија, које својим садржајем потпомажу сагледавању неких специфичних проблема са којима се сусрео аутор, како у пољу расхладне технике, тако и у пољу конструкције, динамике и осетљивости инфрацрвених сензора и неких општих питања савремене теорије и праксе аутоматског управљања.

Највећи број цитираних референци је најновијег доба и обухвата период између 2000 и 2011. године.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У овој докторској дисертацији је коришћен основни научни метод у коме се на основу потпуног познавања чињеница, методом индукције постављају хипотезе.

Након постављања хипотеза, логичком анализом, потпомогнутом предикцијом, сагледава се позиција постављеног научног проблема сходно савременим општим захтевима, примереним овој научној области истраживања.

По завршетку теоријских анализа и формираних математичких модела, кроз бројна експериментална испитивања извршена је верификација математичких модела, проверена веродостојност и оправданост теоријских поставки и утврђена исправност, коректност и оправданост предложених поступака синтезе и могућности пројектовања побољшаног решеља.

За истраживања у овој докторској дисертацији користиле су се теоријске, експерименталне научно-истраживачке методе и нумеричке методе.

Основне теоријске научне методе које су примењене у изради дисертације су:

- Методе анализе приликом изучавања процења струјања расхладног флуида у свим секцијама криогеног размењивача топлоте.
- Методе математичког моделирања свих функционалних јединица (секција) разматраног размењивача топлоте.
- Метода дескрипције у описивању коришћене опреме, елемената, појава, стања и добијених резултата експерименталних испитивања.
- Методе синтезе за реализацију строгих захтева постављених објекту управљања
- Методе за ефикасну реализацију експерименталних испитивања у лабораторијским условима;
- Нумеричке методе за верификацију и проверу веродостојности изведених математичких модела.

Све изабране методе су адекватне за проблематику истраживања и правилно су коришћене у фази развијања теоријских модела, анализи резултата на бази спроведене симулације и при извођењу релевантних закључака.

3.4. Применљивост остварених резултата

Радам у области теме докторске дисертације кандидат мр Александар Сићовић, дипл. инж. маш. је постигао изванредне научно-истраживачке резултате са трајном научном вредношћу и практичном применљивошћу у домену експлоатације криогених размењивача топлоте.

Резултати теоријских истраживања верификовани су бројним експерименталним испитивањима, како за нерегулисани објекат, тако и за систем у затвореном колу дејства, када је разматрани објекат повезан са класичним ПИД регулатором и опцијом када је таквом

систему у отвореном колу придодат преносни орган (**PWM** – ширински модуо) чиме је реализовано дискретно (импулсно) управљање.

Истраживања спроведена током израде дисертације представљају добру основу за даљи рад на проучавању разних утицаја на рад детектора, а самим тим и на сва остала питања конструкције, поузданости и ефикасности рада самог кригеног размењивача топлоте.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је током израде дисертације показао да је самосталан у постављању, препознавању и решавању научно-истраживачких задатака као и пропратних техничких проблема и да успешно влада научно-истраживачким методама, најширег спектра.

Велико радно искуство у области анализе, истраживања и испитивања криогених размењивача топлоте и одлична теоријска знања пружају основу за квалитетан самосталан научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни резултати овог рада могу се систематизовати и сумирати кроз следеће научне, методолошке и стручне доприносе.

1. Општи допринос у овој докторској дисертацији је генерацијска надградња једног типа, досада коришћеног нерегулисаног кригеног мини-хладњака, у нови, побољшани тип, делимично или потпуно регулисаног, исте или сличне конструкције .

2. Допринос у примени теорије идеалног гаса на реалне гасове за потребе решавања математичког модела разматраног термодинамичког процеса хлађења и детерминистичке анализе међузависности синергијских процеса термодинамике, размене топлоте и масе, механике флуида (гасодинамике), криогене технологије, затим система аутоматског управљања, као и неких других пратећих области.

3. Допринос термодинамици, анализом Џул-Томсоновог коефицијента реалних гасова–расхлађивача са различитим карактеристикама, чије променљиве вредности у току циклуса хлађења, битно доприносе ефикасности хладњака. Такође је формиран израз за промену густине реалних гасова, у зависности од притиска и степена сувоће вредности блиских јединици, као и теоријски израз за истицање реалног гаса са трењем.

4. На бази теоријских анализа конструисана је нова врста Џул-Томсоновог мини-хладњака који може истовремено да задовољи шири спектар одржавања кригене температуре, у условима, ван и у оквиру одговарајућег контра притиска испаравања, карактеристичаног за двофазну област .

5. Анализиран је и практично реализован фреквентно-импулсни тип процесне регулације, усаглашен са нестационарном термодинамиком рекуперативног кригеног мини-хладњака. Ово је остварено новим феноменолошким приступом базираним на анализи карактеристичног времена гасодинамичког система ,ради оцене применљивости оваквог начина регулације. Развијен је нови тип извршног органа састављен од класичног ПИД преносног органа, са редно придруженом **PWM** – јединицом, који користи директно дискретно (импулсно) управљање разматраним процесом, познатом у литератури као ширинска амплитдна [регулација](#).

6. Посебан допринос је експериментални рад који је захваљујући ново развијеној универзалној методологији мерења, обезбедио снимање прелазних процеса за различите типове хладњака, расхлађивача, као и различите типове континуалне и импулсне регулације. Такође, експерименти су дали нове експерименталне, емпиријске формуле за експанзију реалног гаса из једнофазне у двофазну област и омогућили допунске податке за свеобухватну симулацију и поједностављење сложеног математичког модела процеса управљања хлађењем који је развијен у дисертацији.

7. Дат је термотехнички допринос конструкцији рекуперативних мини - хладњака употребом спиралног проточног елемента у коме се врши размена топлоте са максималним топлотним флуксевима у минималној запремини, ради коришћења на ракетним и муницијским самонавођеним подсклоповима.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

На основу прегледа литературе и сагледавања постојећих решења из области докторске дисертације, констатујемо да су овде презентовани резултати истраживања оригинални, самостални и значајни и да су применљиви у пракси.

Истовремено, на основу увида у задате циљеве истраживања и резултате представљене у докторској дисертацији, може се закључити да су пружени одговори на сва релевантна питања и решени проблеми са којима се кандидат сусрео у току истраживања.

Установљене чињенице истраживања су корак напред и воде ка унапређењу постојећих метода за анализу динамичког понашања посебних класа криогених размењивача топлоте, као и за њихову синтезу реализовану континуалним или дискретним (импулсним) управљањем.

4.3. Верификација научних доприноса

Кључни резултати и научни допринос докторске дисертације су верификовани у научним часописима са SCI листе:

Категорија M23:

1. Sicovic, A., Milinovic, M., Jeremic, O. (2011). Experimental equipment research for cryogenic Joule-Thompson cryocoolers comparison in IR technology sensors, *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, vol. 57, no. 12, p.936-946.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација под називом: „**Упоредна динамичка анализа посебних типова размењивача топлоте**“ кандидата мр **Александра Сићовића**, дипл. инж. маш. представља нов, савремен и оригиналан научни допринос, који омогућава потпуну анализу разматраних проблема везану за динамику савремених криогених размењивача топлоте као и солидну основу за пројектовање квалитетних управљачких система, како би се у потпуности одговорило, данас, веома строгим а кад кад и опречним захтевима, који се намећу апостојећим системима аутоматско управљања.

На основу свега изложеног и чињенице да је анализирана проблематика изузетно савремена и актуелна, са задовољством се констатује да је кандидат мр **Александар**

Сићовић, дипл. инж. маш., успешно завршио докторску дисертацију у складу са постављеним циљевима.

Кандидат је дошао до оригиналних научних резултата, који су и верификовани, а што им све може обезбедити и значајну примену у широј области савремене криогене технике, посебно у примени у војној индустрији.

На основу прегледа докторске дисертације од стране Комисије за оцену и одбрану докторске тезе под називом: „**Упоредна динамичка анализа посебних типова размењивача топлоте**“, кандидата мр **Александра Сићовића**, дипл. инж. маш. из Београда, са задовољством се констатује да је урађена докторска дисертација написана према свим стандардима научно-истраживачког рада, као и да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању и Статутом Машинског факултета у Београду.

Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да Извештај прихвати, дисертацију стави на увид јавности и упути Извештај на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду и да се након тога кандидат позове на јавну одбрану.

У Београду 15. 09. 2015. год.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
др Драгутин Љ. Дебековић, ред. проф., ментор
Машински факултет Универзитета у Београду

.....
др Момчило Милиновић, редовни професор
Машински факултет Универзитета у Београду

.....
др Цветко Црнојевић ред. професор
Машински факултет Универзитета у Београду

.....
др Владимир Стевановић ред. професор
Машински факултет Универзитета у Београду

.....
др Томислав Шекара ванр. професор
Електротехнички факултет Универзитета у Београду