

**ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА**

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидаткиње **Александре М. Јовановић**, дипл. мат.-инфор., студенткиње докторских студија

Одлуком бр. 1507/3 од 25. 08. 2016. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње **Александре М. Јовановић**, дипл. мат.-инфор. под насловом:

**ДИНАМИКА ПОСЕБНИХ КЛАСА СИСТЕМА СА КАШЊЕЊЕМ  
НА КОНАЧНОМ ВРЕМЕНСКОМ ИНТЕРВАЛУ**

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

Докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду, на смеру за аутоматско управљање, кандидаткиња **Александра М. Јовановић**, дипл. мат.-инфор., уписала је школске **2011/2012.** године.

Кандидаткиња је пријавила тему докторске дисертације под називом: „АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ПОСЕБНИХ СИСТЕМА СА КАШЊЕЊЕМ НА КОНАЧНОМ ВРЕМЕНСКОМ ИНТЕРВАЛУ” и за ментора предложила проф. др Драгутина Љ. Дебељковића и др Сретена Б. Стојановића, ванред. проф. Технолошког факултета у Лесковцу, Универзитета у Нишу.

На основу пријаве кандидаткиње број 599/1 од 18.03.2013. године, сагласности Катедре за аутоматско управљање број 559/2 од 01.04.2013. године, Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду је одлуком бр. 750/2 од 04.04.2013. године прихватило предлог и именовало Комисију за подношење извештаја о прихватању теме докторске дисертације и њене научне заснованости у саставу: др Драгутин Љ. Дебељковић, ред. проф. (ментор), др Сретен Б. Стојановић, ванред. проф., Технолошки факултет Лесковац, (коментор) и др Михаило П. Лазаревић, ред. проф.

На основу извештаја Комисије, бр. 1212/1 од 31.05.2016. године и одлуке Наставно-научног већа Машинског факултета у Београду, бр. 1212/2 од 02. 06. 2016. године, прихваћена је научна заснованост теме докторске дисертације и констатовано је да кандидаткиња Александра М. Јовановић, дипл. мат.-инфор., испуњава све услове за израду докторске дисертације, чији је наслов на сугестију Већа докторских студија преименован у „ДИНАМИКА ПОСЕБНИХ КЛАСА СИСТЕМА СА КАШЊЕЊЕМ НА КОНАЧНОМ ВРЕМЕНСКОМ ИНТЕРВАЛУ“.

Сагласно тој Одлуци поднет је захтев Машинског факултета Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду (захтев бр. 1072/6 од 22.06.2016. године), које је на седници одржаној 04.07.2016. године донело Одлуку да се даје сагласност на предлог теме докторске дисертације **Александре М. Јовановић**, дипл. мат.-инфор. (одлука бр. 61206-2947/2-16 од 04.07.2016. године), и одобравању рада на предметној дисертацији под менторством проф. др Драгутина Љ. Дебељковића и др Сретена Б. Стојановића, ванред. проф.

## 1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација „ДИНАМИКА ПОСЕБНИХ КЛАСА СИСТЕМА СА КАШЊЕЊЕМ НА КОНАЧНОМ ВРЕМЕНСКОМ ИНТЕРВАЛУ” припада области техничких наука (машинство) и ужој научној области Аутоматско управљање.

Израдом докторске дисертације руководили су: др Драгутин Љ. Дебељковић, редовни професор на Катедри за аутоматско управљање Машинског факултета Универзитета у Београду и др Сретен Б. Стојановић, ванред. проф. Технолошког факултета у Лесковцу, Универзитета у Нишу.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

**Александра М. Јовановић**, рођена је **07.04.1983. год.** у **Пожаревцу**, где је завршила Пожаревачку гимназију, природно математичког смера.

У периоду од **2002 – 2010** - студира Природно – математички факултет у Крагујевцу, Универзитет у Крагујевцу, (смер математичко - информатички), и стиче звање дипломираног математичара – информатичара које је изједначено са звањем **мастер информатике**.

У току студија остварила је просечну оцену студија од **7,58** (седам и 58/100).

Школске **2011/12** године уписала се на докторске студије на Машинском факултету у Београду, група за Аутоматско управљање и положила све испите на докторским студијама предвиђене наставним планом и програмом.

Током **докторских студија** на Машинском факултету у Београду остварила је просечну оцену студија **9,87** (девет и 87/100).

Од септембра **2010** године била је ангажована за рад на неодређено време у Економско-трговинској школи у Пожаревцу (60% радног времена) и у Политехничкој школи у Пожаревцу (40% радног времена) за радно место професора математике.

Од октобра **2011** године ангажована је на Високој техничкој школи струковних студија у Пожаревцу за сарадника у реализацији вежби из предмета Математика, у зимском семестру, као и вежби из предмета Основи биостатистике, у летњем семестру.

Кандидаткиња је, као сарадник на Високој техничкој школи струковних студија у Пожаревцу, од уписа докторских студија 2011. године до подношења захтева за одобрење дисертације, активно учествовала у држању вежби на предметима: Математика, Биостатистика, Математичко моделирање екосистема, Механика, Примена рачунара, Софтверски алати и Инжењерска графика.

У току **2011** године – обавила је стручно усавршавање на семинару „Унапређивање наставе математике“ од стране Друштва математичара Србије, као и програм „Активног учења“ од стране образовног форума Београд.

На конкурсном расписаном од стране Високе техничке школе струковних студија у **Пожаревцу**, изабрана је **14. јануара 2016. године**, у звање **асистента** и примљена у радни однос са пуним радним временом, на одређено време од 3 године и то за ужу научну област: **Математика**.

Кандидаткиња је од уписа на докторске студије у школској години 2011/2012., редовно уписала другу годину (школска година 2012/13.) и трећу годину (школска година 2013/14.).

У школској години 2014/15. је први пут обновила трећу годину, а у школској години 2015/16 год. је и други пут обновила трећу годину.

Све испите, на докторским студијама, кандидаткиња је положила већ у трећој години студија, **крајем 2013. године**.

Као студенткиња Докторских студија, кандидаткиња је кроз вишегодишњи рад постала аутор или коаутор укупно 9 радова објављених у међународним и националним часописима, као и у зборницима радова међународних и националних научних скупова.

Коаутор је и једне монографије националног значаја, тематике блиско повезане са темом докторске дисертације.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација „ДИНАМИКА ПОСЕБНИХ КЛАСА СИСТЕМА СА КАШЊЕЊЕМ НА КОНАЧНОМ ВРЕМЕНСКОМ ИНТЕРВАЛУ ” изложена је на 170 страница формата А4 и садржи 390 једначина, 10 слика и дијаграмска приказа, 1 табелу и 340 коришћених референтних литературних извора.

Докторску дисертацију чини следећих шест поглавља и један додаток:

#### **Увод**

#### **Општа разматрања**

I Општи део

II Опште особине класе разматраних система

#### **Квалитативне и квантитативне особине класа разматраних система**

III Временски континуални сингуларни системи

IV Временски дискретни дескриптивни системи

V Временски континуални системи са кашњењем

VI Временски дискретни системи са кашњењем

VII Временски континуални сингуларни системи са кашњењем

VIII Временски дискретни дескриптивни системи са кашњењем

#### **Нека питања опште теорије стабилности, робусности и стабилизације система**

IX Општа разматрања теорије стабилности система

X Робусност стабилности

XI Методе стабилизације и робусне стабилизације система

#### **Нељапуновска стабилност класа разматраних система**

XII Стабилност на коначном временском интервалу

#### **Стабилност посебних класа система са кашњењем на коначном временском интервалу:**

#### **НОВИ РЕЗУЛТАТИ**

XIII Анализа стабилности

на коначном временском интервалу и практична стабилност

#### **Закључак и правци даљих истраживања**

#### **Литература**

#### **Додаци**

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

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Предмет научне расправе у предложеној докторској дисертацији су посебне класе система са временским кашњењем, које се радикално компликују уколико се њихова динамика одвија унутар сложених система који имају, најмање два подсистема, неуједначених временских скала што подразумева један брз и један спори подсистем, који су принуђени да раде заједно.

Таквих случајева има у пракси, а најеклатантнији је пример парног котла (спори део) и парне турбине (брзи подсистем), динамика сензора и самог моторног возила, итд.

Наиме, већ од седамдесетих година двадесетог века, системи са чистим временским кашњењем привлаче велику пажњу научне и стручне јавности. Њихова појава у роботици, дугачким хидрауличним и пнеуматским и електричним водовима, динамици летелица и великим системима подстакла је бројне научнике да се њима интензивно баве.

*Континуални сингуларни системи*, у математичком смислу, представљају динамичке системе описане комбинацијом алгебарских и диференцијалних (диференцијалних) једначина, што не дозвољава њихово представљање у класичном облику векторске диференцијалне једначине стања, а самим тим и онемогућава решавање тог система једначина уобичајеним методама које се користе за решавање “нормалних” система.

У том смислу, алгебарске једначине представљају ограничење наметнуто решењу, односно решавању дела система који садржи диференцијалне једначине.

У односу на тзв. “нормалне” системе, који по броју далеко превазилазе овде разматрану класу система, бројни резултати и практичне примене показали су да овако формиран модели имају евидентне предности.

Сама чињеница да су сингуларни системи исказани комбинацијом алгебро-диференцијалних једначина, повлачи за собом низ специфичности и особености које их јасно издвајају и разликују у односу на тзв. “нормалне” системе.

У том смислу, разматрања егзистенције, јединствености и структура тих решења представљају фундаментална питања, на која треба глобално одговорити, а у светлу постављених циљева истраживања.

Мимо тога, постојање импулсних чланова и временских извода улазних величина у кретању сингуларних система, као и могућа несвојственост преносне матрице и некаузалност између улазних величина и величина стања и излаза, чине их још више специфичним, а самим тим и привлачнијим са научног становишта.

На крају ваља истаћи да, ма колико су сва та настојања ишла у правцу истраживања њихових специфичности, ипак треба признати да се садашњи општи тренд њиховог разматрања утапа у покушаје извођења резултата који проистичу из опште модерне теорије система.

Ово постаје далеко јасније ако се схвати чињеница да се основна решења тих проблема не налазе у целом простору стања, већ да их треба тражити у неком његовом потпростору.

Сингуларни системи се природно појављују у многим инжењерским дисциплинама и проблемима, као што су електрична, електронска и магнетна кола, у динамици летелица и робота и великим енергетским системима и системима са повратном спрегом, у проблемима управљања и оптимизације, а такође и у биологији, економији, демографији и као граничан случај сингуларно пертурбованих система.

Када су у питању њихови дискретни аналози, познати у литератури као *дискретни дескриптивни* системи, јављају се слични, већ раније поменути проблеми, додатно оптерећени питањима њихове физичке остварљивости (каузалност, узрочност), али и ослобођени питања имулсног понашања.

Већ више од пола века *системи са кашњењем* привлаче пажњу научне и стручне јавности широм света. Њихово присуство у свим гранама науке и технике више је него евидентно и у том смислу бројни научни радови и обимна публицистичка делатност у пуној мери су исказали интерес који је за њих био показан.

У математичком смислу, ова класа система описана је обичним диференцијалним (диференцијалним) једначинама са помереним аргуменом, што условљава читав низ додатних потешкоћа **при** њиховом решавању.

С друге стране, у првом случају, као системи бесконачне димензије, њихово проучавање у комплексном домену условљено је суочавањем са трансцедентним преносним функцијама, што у извесним случајевима захтева радикалну преформулацију постојећих критеријума и метода развијених за обичне линеарне системе, а понекада и формирање сасвим нових прилаза и поступака за разрешавање постављених задатака како класичне, тако и модерне теорије аутоматског управљања.

У том смислу, ваља посебно истаћи чињеницу да за ову класу система егзистира један специфичан проблем који се огледа у могућности испитивања стабилности ове класе система кроз две врсте могућих критеријума.

Наиме, добро је познато да се за системе са кашњењем могу оформити услови који не узимају у обзир утицај чисто временског кашњења на стабилност система и они, у инжењерском смислу, сасвим задовољавају и дају релативно једноставне критеријуме, најчешће у виду једноставних алгебарских израза утемељених на коришћењу матрица које, у целости, описује динамику система. Износ чисто временског кашњења не појављује се у тим изразима.

У другом случају, формирају се критеријуми који узимају у обзир износ чисто временског кашњења и као такви они дају далеко бољи увид у утицај овог феномена, поред структуре система изражене кроз системске матрице, на стабилност система. Међутим, њихово добијање далеко је сложеније, као и изрази који их формулишу.

Ваља посебно истаћи и чињеницу да у оба поменута случаја, већина објављених резултата дају само довољне услове стабилности, што свакако представља њихову мањкавост, више са теоријске стране а мање са практичне. Сама та чињеница омогућила је велики број резултата који су ишли у потрагу за што мање конзервативнијим резултатима, почев још од далеке 1981. године.

Треба истаћи и да постоји велики број система аутоматског управљања у којима је изражен истовремени феномен чисто временског кашњења и евидентна сингуларност тако да ова класа система, позната под именом *Сингуларни системи са кашњењем*, заслужује посебну пажњу имајући у виду да недвосмислено обједињује раније указане специфичности појединачних класа, овде, разматраних система.

Ови системи имају многе специфичне карактеристике.

Ако је потребно да се, исти, ригурозно опишу, неопходно их је пројектовати са завидним степеном тачности, а да би се квалитетно управљало њима, потребно је поклонити веома велику пажњу дубокој спознаји њихових суштинских особина и посебности које их у, великој мери, разликују од других класа система.

У математичком смислу ова класа система аутоматског управљања представљена је системом диференцијалних једначина са помереним аргументом, којима је придружен систем одговарајућих алгебарских једначина које у општем случају могу бити, такође, са помереним аргументом или без њега.

Када су у питању системи који представљају дискретни аналоган претходним, говори се о *дискретним дескриптивним системима са кашњењем*, а они су, пак, представљени комбинацијом диференцијалних једначина са помереним аргументом и алгебарским, диференцијалним које могу али не морају да садрже кашњење.

Све ове класе система, данас веома присутне у актуелној теорији и пракси аутоматског управљања, биле су у жижи интересовања кандидаткиње и то првенствено са становишта њихове динамике на коначном временском интервалу а делимично и синтезе, којом се могу остварити, данас, веома често строги али и опречни захтеви.

Уз све то најсавременији концепти теорије система и управљања очекују и солидну робусност система, што значи да их треба тако пројектовати да у случајевима структурних и неструктурних пертурбација или недоречености њихових модела који се користе, рецимо у адаптивном управљању, такви номинални системи задрже своје примарне особине и у тим отежавајућим околностима.

Кандидаткиња у **уводном делу и првом поглављу** веома детаљно анализира и представља предметне класе разматраних система, са посебним освртом на класе временски непрекидних, а нешто мање, на класе временски дискретних система, што је и природно имајући у виду тематику [њене](#) докторске дисертације.

Излажу се елементарне специфичности сингуларних и дескриптивних система, и у том смислу, посебно се апострофира значај питања егзистенције и јединствености решења, проблем импулсних понашања и конзистентних почетних услова, као и питање физичке остварљивости (каузалности) система.

Посебно се апострофира феномен чисто временског кашњења, који обележава велики број класа система аутоматског управљања. Добро је познато да његово присуство има неповољан утицај на динамичке карактеристике система, а посебно на стабилност система са повратном спрегом.

Кашњење се може јавити у улазним или излазним величинама, али је његов најзначајнији утицај на динамику система највише изражен када је оно присутно у стању система.

У неким једноставнијим случајевима, присуство кашњења проузрокује само временски помак излазног сигнала а, у случајевима када је кашњење присутно и у стању система и до његовог временског помераја али и могућег изобличавања, а што је незаобилазно код свих система бесконачне димензије (континуални системи са кашњењем и системи са расподељеним параметрима).

Нужно присуство функције почетних услова, још више усложњава ионако сложени проблем изналажења решења.

Класа временски непрекидних сингуларних система са кашњењем, обједињује све специфичности претходно поменутих класа система и јасно из свих поменутих разлога најсложенија је за динамичку анализу. У том смислу питања скупа конзистентних почетних функција, представља најзначајније питање које се мора решавати а све са циљем да се добију решења у затвореном облику са неимпулсним обележјима.

У истом том смислу понашају се и временски дискретни дескриптивни системи са кашњењем, као реално постојећи или као дискретни аналози ових првих.

Настављајући даље, кандидаткиња се осврће на значај испитивања стабилности свих класа, овде разматраних система и указује на постојање две групе критеријума, једне који узимају у обзир износ чисто временског кашњења и друге који то не чине.

Разматра њихове предности и недостатке, све то елегантно повезујући са савременим могућим концептима стабилности.

У том смислу помиње стандардни љапуновски прилаз, као и прилаз који је далеко ближи инжењерској пракси познат у литератури под називом концепт техничке или нељапуновске стабилности са своја два посебно значајна концепта: концепт стабилности на коначном временском интервалу и концепт практичне стабилности.

Не мањи значај кандидаткиња посвећује значајним питањима робусности и стабилизације система, полазећи од претпоставке да је систем у отвореном колу дејства, по правилу, управљив, указујући да и ситуације када тај услов није испуњен не треба занемаривати и тражити адекватна решења.

У **другом поглављу** акценат излагања је усмерен на детаљном приказивању квалитативних и квантитативних особина свих разматраних класа система, како би се припремила солидна подлога за каснија проучавања и истраживања на пољу робусности, стабилности и стабилизације система.

Тако се за сингуларне (дескриптивне) системе излажу детаљно питања постојања и јединствености решења, питања конзистентних и неконзистентних почетних услова, где ови други воде у импулсна понашања неприхватљива за понашања реалних система, разматрају се могуће каноничке форме, индекс сингуларности, физичка остварљивост у смислу узрочности и каузалности итд. Наводе се и могућа решења векторских диференцијалних једначина које у виду математичких модела на овај начин или кроз модел у простору стања исказују њихову динамику. У многим приликама, када се стабилност система доказује преко одговарајуће *Дефиниције*, ови изрази имају фундаменталан значај.

Када су у питању системи са кашњењем, као временски континуални тако и временски дискретни, и ту се разматрају фундаментална питања као што су: димензионалност система, приказ система у комплексном и фреквентном домену, временски одзиви и могућности апроксимација система са кашњењем обичним диференцијалним једначинама **без** помереног аргумента.



У последњем делу овог поглавља сумирају се особине сингуларних (дескриптивних) система са кашњењем, јасно, проистекле простом суперпозицијом свих особина које поседују претходне две класе система, што јасно указује на сву сложеност њихове ригорозне динамичке анализе.

У **трећем поглављу** кандидаткиња детаљно и исцрпно износи, хронолошки преглед основних концепата стабилности, посебно стабилност система у смислу Љапунова, као основног концепта који се примењује у динамичкој анализи система. Много више простора кандидаткиња посвећује различитим концептима тзв. техничке или нељапуновске стабилности.

У том смислу посебно се истиче концепт *стабилности на коначном временском интервалу* и концепт *практичне стабилности*. Указује се на њихов значај са инжењерске тачке гледишта и применљивости у свакодневној потреби управљања технолошким и другим процесима.

Апострофирајући значај нељапуновске стабилности кандидаткиња констатује да је у пракси често од посебног интереса, не само испитивати стабилност система по Љапунову, већ је од далеко већег значаја утврдити да ли трајекторије система, при његовом кретању у простору стања, досежу или превазилазе или остају унутар раније прописаних граница.

Систем може да буде стабилан у смислу Љапунова а потпуно неупотребљив са становишта његових показатеља прелазног процеса. Ту се у првом реду мисли на недозвољени прескок или неприхватљиво дуго време смирења. Због тога је сасвим оправдано кретање система посматрати унутар унапред прописаних граница које се могу усвојити у облику хипер-цилиндара у простору стања који могу бити схваћени као скупови дозвољених стања у којима се систем може задесити.

Исти ти скупови могу бити стационарни или временски променљиви и потребно је да буду унапред дефинисани.

Мимо тога, од посебног је интереса да се и динамичко понашање система посматра на коначном временском интервалу, а не бесконачном како захтева теорија стабилности у смислу Љапунова, што је само прихватљиво у теоријским разматрањима али не и у практичним применама.

Границе до којих достиже одзив система, било у слободном било у принудном радном режиму, представља веома значајан проблем са инжењерско-техничке тачке гледишта. Уважавајући ову чињеницу, појавио се велики број дефиниција практичне стабилности и стабилности на коначном временском интервалу.

Грубо говорећи, ове дефиниције се базирају на унапред одређеним границама дозвољених почетних стања система као и на дозвољеним границама у којима се очекује кретање разматраног система.

Указујући на све могуће грешке моделирања као и објективне околности у којима раде објекти и процеси аутоматског управљања, кандидаткиња велику пажњу посвећује робусности стабилности система, као једној од најзначајнијих особина, указујући на потребу да та особина буде очувана и у условима у којима се не очекује рад објекта или процеса. Подвлачи се разлика између концепта осетљивости и робусности, документовано еклатантним примерима, који јасно указују на утицај како структурних тако и неструктурних пертурбација на целокупну динамику система, посебно стабилност.

Ово поглавље се завршава класичном анализом постојећих метода за стабилизацију управљивих система у отвореном колу дејства, применом повратних спрега које преузимају информације или од вектора стања система или вектора излазних величина. Имајући у виду да само вектор стања носи пуну информацију о разматраном систему, овом првом прилазу поклања се далеко већа пажња.

У **четвртном поглављу** дата је значајна рекапитулација неких основних резултата на пољу проучавања нељапуновске стабилности свих класа овде разматраних система. Посебно је указано на мотивацију за тамо написане редове и извесне празнине у постојећој литератури, за који постоји већ дужи низ година хронични интерес. У том смислу, у класи различитих нељапуновских концепата стабилности, јасно се апострофирају стабилност на коначном временском интервалу као и практична стабилност, као један њен посебан случај. Објашњен је и концепт атрактивне практичне стабилности и повезан са раније познатим концептом квази-контрактивне стабилности.

Овако изложена материја даје јасан увид у хронолошки настанак и развој фундаменталних резултата на овом пољу изучавања динамике система аутоматског управљања и пружа снажан ослонац за препознавање могућих, даљих праваца истраживања и неких отворених, постојећих **проблема**.

Хронолошка и селективна рекапитулација доприноса на пољу систематског проучавања стабилности разматраних класа система у духу прилаза са позиција стабилности на коначном временском интервалу била је, такође, предмет интересовања кандидаткиње у овом поглављу. Овим излагањима обухваћене су све класе овде разматраних система, са акцентом на новије радове првенствено ментора и њихових сарадника, што је било и природно с обзиром на очекиване резултате предметне дисертације.

У наставку излагања, у овом поглављу, извршен је избор довољно репрезентативних радова из референтне литературе, дат њихов скраћени приказ и апострофиран допринос сваког анализираног рада са позиција будућих потреба дисертације и могућности њихове надградње.

Овде изнети резултати дати су у форми скраћених приказа, утемељени на изворним дефиницијама и формулисаним теоремама, које су, јасно, само наведене без извођења доказа.

Ваља истаћи и неоспорну чињеницу, да се кандидаткиња определила за један ужи избор ових радова из широке могуће плејаде, стављајући у први план само резултате ментора овог рада.

У **петом поглављу** излажу се нови, оригинални и научни доприноси, оличени у бројним *теоремама*, њиховим доказима и евидентном верификацијом кроз нумеричке примере и симулационе поступке.

У том смислу изводе се и бројни резултати, који у форми довољних услова, гарантују *стабилност на коначном временском интервалу*, појединих, овде разматраних класа система, првенствено са кашњењем, а кроз критеријуме, који узимају у обзир износ чисто временског кашњења или који ту значајну чињеницу пренебрегавају.

Имајући у виду овде изнете резултате, лако се показује да они припадају првопоменутој класи критеријума, која далеко превазилази значаја ове друге, јер поред ограничења наметнутих кретању система, укључују квалитативне и квантитативне особине системских матрица а и износ чисто временског кашњења.

У многим приликама, изнети резултати се пореде са постојећим у литератури, са недвосмисленим закључцима да су добијени резултати мање рестриктивни у односу на постојеће или да у неким случајевима захтевају мање сложени математички апарат за верификацију.

Графичким приказима, оличеним у квадрату норме кретања разматраног система, лако се верификује исправност добијених резултата.

На неким местима кандидаткиња се бавила мало и генезом настанка модерних приступа, објашњавајући при томе механизме који они користе у решавању постављених проблема.

Тако за поступке ЛМИ износи неспорну чињеницу да су исти супериорни у односу на све постојеће технике, када је у питању нумерички аспект али и да исти имају одређене мањкавости када је у питању сагледавање утицајних фактора на добро или лоше понашање система у целини. Мимо тога констатује, анализирајући бројне радове, да се одређени нумерички проблеми јављају у оним случајевима када су присутне слабе неједнакости, тако да се до коначних решења практично не може ни доћи. Имајући у виду да се и овде добијају само довољни услови, рецимо стабилности на коначном временском интервалу, ваља истаћи да бројне мајоризације или миноризације дају доста конзервативна решења која могу да буду и слабија од оних које нуде класични прилази.

**И шесто поглавље** доноси нове резултате, овде на пољу практичне и атрактивне практичне стабилности.

Полазећи од идеја, изнетих у раду *Lee, Diant* (1981), успешно се комбинују резултати који гарантују асимптотску стабилност са условима које обезбеђују стабилност на коначном временском интервалу, чиме се лимитира амплитуда прелазног процеса на посматраном временском интервалу, што је од посебног значаја у бројним техничким и технолошким процесима. Користећи прилаз са позиција *максималног солвента*, карактеристичне једначине разматраног система, добија се нелинеарна матрична трансцедента једначина чије критично решење треба заменити у класичну Љапуновљеву једначину, овог пута система без кашњења. Уколико постоји јединствено позитивно решење те једначине систем је асимптотски стабилан. Провера стабилности на коначном временском интервалу може се проверити бројним резултатима, од којих је овде генерисан и један нови који даје мање рестриктивне резултате. Еклатантним примером илустрована је предност једног оваквог прилаза у односу на постојеће, посебно са становишта лакоће нумеричког прорачуна.

Симулацијом динамике система показана је оправданост једног **оваквог** прилаза.



Мимо тога изнети су и бројни доприноси, генерисани у радовима саопштеним на угледним међународним конференцијама који дају, нове довољне услове различитих класа линеарних система са чистим временским кашњењем, како континуалних тако и дискретних, а исто то за класе сингуларних и дескриптивних линеарних система које прати чисто временско кашњење, а у неким приликама и присутна структурна робусност системских матрица.

У седмом поглављу детаљно су систематизовани остварени резултати истраживања и дати правци могућих, будућих истраживања а све на бази овде стечених искустава.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација кандидаткиње Александре М. Јовановић, дипл. мат.-инфор., под називом, „**ДИНАМИКА ПОСЕБНИХ КЛАСА СИСТЕМА СА КАШЊЕЊЕМ НА КОНАЧНОМ ВРЕМЕНСКОМ ИНТЕРВАЛУ**” представља савремен и оригиналан приступ, као и евидентан научни допринос разматраном проблему динамичког понашања посебних класа система са чистим временским кашњењем, који укључују поред класичних система са кашњењем, и сингуларне и дескриптивне са чистим временским кашњењем, као посебну поткласу поменутих базичних система.

Савремени системи аутоматског управљања не могу се замислити а да их не прати феномен кашњења.

Наиме, већ од седамдесетих година двадесетог века, системи са чистим временским кашњењем привлаче велику пажњу научне и стручне јавности.

Њихова појава у роботици, дугачким хидрауличним и пнеуматским и електричним водовима, динамици летелица и великим системима подстакла је бројне научнике да се њима интензивно баве.

Присуство чисто временског кашњења, без обзира да ли је оно присутно у управљању и/или у стању може да произведе нежељене прелазне карактеристике па чак и нестабилност.

Последње поменути случај веома је чест када су у питању системи аутоматског управљања са повратном спрегом.

Због тога је овај проблем наишао на велико интересовање код многих истраживача.

У општем случају разматрање проблема који укључује и чисто временско кашњење повлачи далеко сложенију математичку анализу разматраних система.

Постојећи концепти стабилности, где се у првом реду мисли на њапуновску а у другом на техничку стабилност, унапређују се из дана у дан.

Бројни резултати, имају увек неке полазне претпоставке и често се изводе под одређеним условима и за посебне класе система.

У том смислу није поштеђена ни класа система са кашњењем, а прва проширења концепта стабилности на коначном временском интервалу и практичне стабилности потичу из рада *Debeljković, Nenadić* (1992) када су у питању временски континуални, а из рада *Debeljković, Aleksendrić* (2003) када су у питању временски дискретни системи са чистим временским кашњењем.

Открићем сингуларних система, знатно се проширила могућа класа линеарних система аутоматског управљања са свим специфичностима о којима је било већ речи.

Природним повезивањем претходно поменутих класа система долази се до предметне класе система.

Од тих времена група аутора окупљена око ментора ове докторске дисертације непрестано ради на унапређивању ових резултата што је у овој дисертацији и довело до потпуно нових како резултата тако и прилаза овој проблематици.

Сваки нови резултат, свако ново проширење или слабљење одговарајућих услова представља значајан напредак у применама разматраних концепата стабилности **на** предметне класе система.

У том смислу, ова докторска дисертација генерисала је нових шест значајних и оригиналних резултата, чиме су знатно побољшани услови који обезбеђују стабилност разматраних класа система на коначном временском интервалу, као и када је у питању атрактивна практична стабилност.

Резултати остварени у оквиру овде спроведених теоријских истраживања потврђују актуелност и значај докторске дисертације за научно-стручну јавност, како у Србији тако и у свету. Оригиналност постигнутих резултата је верификована публикавањем радова у међународним часописима и на интернационалним конференцијама, признатог ранга.

Конкретно, у овој дисертацији, поред коришћења класичних прилаза, развијена су и два потпуно нова прилаза. Први прилаз користи квази-Љапуновљеве функције у облику квадрате форме са слободном временски променљивом матрицом у подинтегралној функцији конволуционог интеграла, за добијање довољних услова стабилности на коначном временском интервалу разматраних класа система са чистим временским кашњењем присутним у стању система. При томе се претпоставља да ове функције не морају да буду по знаку одређене као и да њихови изводи дуж трајекторија система не морају да буду негативно одређене функције. Све неопходне мајоризације спроведене су коришћењем Јенсенових и Копелових матричних неједнакости, узимајући у обзир динамичко понашање система са кашњењем на временском интервалу који дефинише границе почетног понашања.

У другом случају, за дискретни дескриптивни систем са кашњењем, формулисан је критеријум стабилности на коначном временском интервалу, који узима у обзир и почетно понашање система са кашњењем у смислу да функција почетних услова припада простору конзистентних почетних функција, што представља апсолутну новину у досадашњим прилазима овој проблематици.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Због изразито комплексног карактера теме докторске дисертације, оличеног у основна два концепта стабилности, неколико других концепата стабилности изложених из компаративних разлога и шест класа разматраних система, коришћена је обимна референтна литература из свих ових области.

Овде се кандидаткиња показао као врсни познавалац референтне литературе из ове тематике, имајући у виду њено учешће као коаутора једне монографије са проблематиком блиској предметној дисертацији. Наиме, на неколико места у дисертацији кандидаткиња, сходно потребама, излаже хронолошки преглед релевантне литературе, која јој је у многоме била инспирација и претходница у генерисању нових резултата.

Посебно је обрађена и приказана литература коауторских радова ментора, а касније и заједничких радова. Референце су навођене на крају сваке главе, као и поглавља, а на крају дисертације, и њен сумарни преглед који износи више од 340 цитата. Већина цитираних радова млађи су од 15 година а потичу из часописа са импакт фактором.

Такође, кандидаткиња се позива и на анализе, резултате и закључке објављене у научно-стручним часописима високог ранга и конференцијама међународног значаја, што указује на савременост докторске дисертације. На тај начин, дат је приказ постојећег стања у сфери коме припадају проблеми разматрани у докторској дисертацији. Наведене референце представљају снажан извор информација, знања и фундамената за генерисање прегледа стања у предметним областима истраживања а и шире.

Коришћене и наведене референце представљају избор савремене и актуелне литературе и уједно указују и на могућности даљег проширења научног сазнања у областима истраживања приказаних у овој докторској дисертацији.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Кандидаткиња користи аналитичке методе истраживања које су добро познати научној и стручној јавности, а огледају се у примени модификоване друге методе Љапунова или примене квази-Љапуновљевих функција као агрегационих функција, посебно бираних, за предметне **класе** система.

Афирмација изабраних методолошких поступака, који генеришу довољне услове стабилности, разматраних класа система у потпуности је постигнута новим, квалитетним и мање рестриктивним резултатима у односу на оне које тренутно постоје у пракси.

Као круна свега, коришћени су нови оригинални поступци, утемељени на наменском коришћењу конволуционог интеграла и строгог захтева о испуњености позитивне одређености неких квадратних форми на потпросторима конзистентних почетних функција, што представља нове прилазе без којих је данас незамисливо квалитетно анализирати или синтетизовати управљачка дејства савремених система аутоматског управљања.

Све то је илустровано бројним нумеричким примерима, где је здушно примењен програмски пакет MATLAB, као и програмски пакет SIMULINK.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Добијени резултати имају практичну примену у савременој теорији и пракси аутоматског управљања и могу се применити на све предметне класе изучаваних система под претпоставком да су познати њихови веродостојни математички модели. Сама верификација резултата показана је кроз бројне школске примере, што не умањује њихов значај када су у питању реални системе са њиховим конкретно израчунатим константама или временским константама.

### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

За време израде дисертације кандидаткиња је показала способност за самостални научни рад, као и да решава сложене проблеме користећи најсавременије резултате везане за садржај и тематику предметне докторске дисертације.

То је документовано познавањем широког спектра савремених референци и коначно самосталним решавањем бројних проблема који су својевремено били предочени у планираним и очекиваним резултатима ове докторске дисертације, а који су резултирали у бројне објављене радове, како на реномираним конференцијама тако и у угледним домаћим и међународним часописима.

Кандидаткиња је учествовала у бројним коауторским радовима и једној монографији националног значаја и тиме показала висок степен стручности и смисла за самоиницијативни рад. Самим тим показала се и као веома погодна личност за тимски рад.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Остварени научни доприноси, настали као резултат истраживања у оквиру предметне докторске дисертације, огледају се кроз нове теоријско-аналитичке резултате и симулациону верификацију:

- Детаљно је сакупљена, проучена и систематизована релевантна литература, везана за све аспекте ове дисертације а и шире.
- Дат је систематичан, целовит и детаљан приказ основних особина шест класа линеарних система аутоматског управљања и указано на особине значајне за њихову динамичку анализу.
- *Формулисане* су и доказане *Теореме*, које за различите класе временски континуалних и дискретних система са чистим временским кашњењем, дају потпуно нове алгебарске довољне услове стабилности ових класа система, како на **коначном временском интервалу** тако и када је у питању **практична атрактивна стабилност**.

Мимо тога, одређени број нових резултата излаже критеријуме који узимају у обзир износ константног чисто временског кашњења, што је од посебног значаја за инжењерску праксу јер даје евидентан увид у којој мери то кашњење погоршава динамичке особине разматраних **система**.

Тиме је постигнуто да се иста класа система може разматрати са адекватног становишта усвојеног концепта стабилности не само преко системских матрица, већ и са допунском информацијом о износу кашњења, што квалитативно и квантитативно употпуњује сазнања о стабилности разматраног система.

- Исти прилаз, а као потпуно нови резултат, даје довољне услове стабилности посебне класе линеарних **временски дискретних дескриптивних система са чистим временским кашњењем**. У односу на друге раније развијене прилазе, овде је формулисана потпуно нова *Теорема о стабилности на коначном временском интервалу* поменуте класе система, која узима у обзир и почетно стање система, које мора да поседује прихватљиву конзистентну функцију почетних услова, што се у крајњој линији, у математичком смислу, своди на захтев да одговарајућа квадратна форма буде позитивна само на потскупу конзистентних почетних услова. Овај значајан математички резултат, може се превазићи у пракси одговарајућим захтевом у погледу управљивости или обсервабилности матрица које непосредно проистичу из системских.

- У посебном случају, када нема кашњења или изостаје сингуларност, поменути резултати, своде се на добро познате, од раније изведене резултате за обичне системе аутоматског управљања.

- Коришћењем познатих алгебарских векторских матричних неједначина, уз актуелизацију нових мајоризација, добијени резултати су мање рестриктивни од постојећих или су у нумеричком третману далеко једноставнији за аналитичку примену.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Изнети доприноси аутора подељени су већ и раније у две групе: класичан прилаз и прилаз који користи алгебарске неједначине типа Јансен и Копел.

Оно што је непосредно уочљиво, кандидат је резултате остварио у једном хармонијском хронолошком редоследу, одбацујући неке од ранијих услова, коришћених у постојећој литератури, императивно наметнуте у класи прворешаваних проблема.

Последњи резултати представљају крајње опште резултате у овој техници прилаза њиховом решавању.

Како су у питању довољни услови, основни доприноси ове докторске дисертације леже у новим прилазима за добијање побољшаних критеријума стабилности на коначном временском интервалу и атрактивне практичне стабилности, у смислу да су изведени резултати мање рестриктивни или далеко једноставнији за нумерички третман од постојећих у савременој литератури.

Ваља истаћи и неоспорну чињеницу да овде изнети резултати значајно и оригинално представљају проширење постојећих прилаза на нове класе система са чистим временским кашњењем, који се раније нису појављивали у референтној литератури. У једном случају, један резултат представља и методолошки искорак и новину, јер уводи и потпростор конзистентних почетних функција у разматрање особина стабилности класе дискретних дескриптивних система.

Сви ови резултати знатно доприносе унапређењу сазнања о понашању овде разматраних класа система на њихове особине стабилности на коначном временском интервалу, а и у духу концепта практичне стабилности.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Научни допринос докторске дисертације је верификован радовима објављеним у референтним научним часописима и саопштењима на међународним конференцијама високог ранга:

### Рад у међународном часопису М23

- [1] Debeljković, D. Lj, S. B. Stojanović, **A. M. Jovanović**, “Finite Time Stability of Continuous Time Delay Systems: Lyapunov – like Approach with Jensen’s and Coppel’s Inequality”, *Acta Polytechnica Hungarica (Hungary)*, Vol. 10, No. 7, (2013), pp. 135 – 150, DOI: 10.12700/APH.10.07.2013.7.10, ISSN 1785 – 8860, IF: 0.471

### Радови саопштени и објављени у зборницима радова са међународних конференција М33

- [1] I. M. Buzurović D. Lj. Debeljković, **A. M. Jovanović**, “An Efficient Method for Finite Time Stability Calculation of Continuous Time Delay Systems”, *Proc. ASCC 2013, Istanbul (Turkey)*, June 23 – 26 June 2013, pp. 1-5, DOI: 10.1109/ASCC.2013.6606000, 978-1-4673-5769-2/13/\$31.00©2013 IEEE.
- [2] D. Lj. Debeljković, S. B. Stojanović, **A. M. Jovanović**, M. Misić, “Stability of Discrete Descriptor Time Delay Systems on Finite Time Interval: New Delay Dependent Conditions“, *Proc. 13th MELECON, Chania (Greece)*, June 25 – 28, (2013) pp. 652 – 657, DOI: 10.1109/MED.2013.6608792, 978-1-4799-0995-7/13/\$31.00 ©2013 IEEE.
- [3] Debeljkovic, D. Lj., I. M. Buzurovic, S. B. Stojanovic, **A. M. Jovanovic**, “Novel Conditions for Finite Time Stability of Discrete Time Delay Systems”, *Proc. ICSSE 2013(IEEE International Conference on System Science and Engineering)*, July 4 – 6, 2013, Budapest (Hungary), pp. 177-181, DOI: 10.1109/ICSSE.2013.6614655, CD-Rom, ISSN 978-1-4799-0007-7.
- [4] Debeljkovic, D. Lj., I. M. Buzurovic, **A. M. Jovanovic**, N. J. Dimitrijevic, G. V. Simeunovic, “ Delay-Dependent Conditions for Finite Time Stability of Continuous Systems with Latency”, *Proc. of 10<sup>th</sup> International Symposium on Intelligent Systems and Informatics, Subotica, (Serbia)*, 23 – 26 September, (2013), 161 – 166, DOI: 10.1109/SISY.2013.6662561, CD – Rom ISSN 978-1-4799-0305-4/13/\$31.00 ©2013 IEEE
- [5] Debeljkovic, D. Lj., I. M. Buzurovic, **A. M. Jovanovic**, G. V. Simeunovic, “ On Finite Time Stability of Continuous Time Delayed Systems: New Delay Dependent Conditions”, *Proc. 27<sup>th</sup> Chinese Control and Decision Conference CCDC 2015, Qingdao (China)*, 23 – 25, May, (2015), pp. 5364 – 5369, DOI: 10.1109/CCDC.2015.7162880, **978-1-4799-7016-2/15/\$31.00\_c 2015 IEEE**.
- [6] Debeljkovic, D. Lj., I. M. Buzurovic, **A. M. Jovanovic**, G. V. Simeunovic, “On Attractive Practical Stability of Systems with State Delay: A New Algebraic Inequalities Approach”, *Proc. 27<sup>th</sup> Chinese Control and Decision Conference CCDC 2015, Qingdao (China)*, 23 – 25, May, (2015), pp. 5340 – 5345, DOI: 10.1109/CCDC.2015.7162876, **ISSN 978-1-4799-7016-2/15/\$31.00\_c 2015 IEEE**

### Монографија националног значаја М42

- [1] Д. Љ. Дебељковић, М. А. Мишић, **А. М. Јовановић**, *Линеарни сингуларни системи са чистим временским кашњењем*, III део, Машински факултет, Београд, 2014. стр. 448, ISBN- 978 - 86 - 7083 - 792 - 8.

### Рад у часопису националног значаја М51

- [7] D. Lj. Debeljkovic, S. B. Stojanovic, **A. M. Jovanovic**, “Further Results on Finite Time and Practical Stability of Linear Continuous Time Delay Systems“, *FME Trans. Vol. 41, No. 3 (2013)* pp. 241 – 249. [http://www.mas.bg.ac.rs/\\_media/istrazivanje/fme/vol41/3/10\\_ddebeljkovic.pdf](http://www.mas.bg.ac.rs/_media/istrazivanje/fme/vol41/3/10_ddebeljkovic.pdf)

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Комисија је мишљења да поднета докторска дисертација кандидаткиње **Александре М. Јовановић**, дипл. мат.-инфор., представља оригиналан и вредан научни рад, који даје значајан допринос проширивању концепта нељапуновске стабилности (стабилности на коначном временском интервалу и практичне стабилности) на посебне класе линеарних временски континуалних и временски дискретних система аутоматског управљања са чистим време кашњењем.

Други, не мање значајни допринос лежи у формирању нових критеријума за испитивање особине стабилности на коначном временском интервалу дискретних дескриптивних система са чистим временским кашњењем, узимајући у обзир њихова понашања у прошлости, односно у потпростор конзистентних почетних функција, што представља апсолутну новину, када су у питању системи са кашњењем.

Ова дисертација има и практичан значај јер се изнети резултати без проблема могу имплементирати у све оне реалне проблеме у којима је заступљена предметна класа система аутоматског управљања, како у њиховој анализи тако и у синтези класичних, оптималних и адаптивних концепата управљања, а пружа и солидне основе да се овде изведени резултати надограде у духу концепта робусности, било да су у питању структурне или неструктурне пертурбације.

Комисија за оцену и одбрану закључује да је урађена докторска дисертација кандидаткиње, **Александре М. Јовановић**, дипл. мат.-инфор., под називом: **ДИНАМИКА ПОСЕБНИХ КЛАСА СИСТЕМА СА КАШЊЕЊЕМ НА КОНАЧНОМ ВРЕМЕНСКОМ ИНТЕРВАЛУ** написана према свим стандардима и позитивној пракси у научно-истраживачком раду, као и то да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању и да је у складу са Статутом и Правилником о докторским студијама Машинског факултета Универзитета у Београду.

Сходно члану 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета у Београду, Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да овај Реферат прихвати, дисертацију стави на увид јавности и упути Реферат на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, а да се након тога кандидаткиња позове на јавну одбрану.

### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

---

Проф. др **Драгутин Љ. Дебељковић**, ментор  
Универзитет у Београду, Машински факултет

---

Проф. др **Михаило П. Лазаревић**  
Универзитет у Београду, Машински факултет

---

Др **Сретен Б. Стојановић**, ванредни професор, ментор  
Универзитет у Нишу, Технолошки факултет у Лесковцу