

## ТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ „МИХАЈЛО ПУПИН” ЗРЕЊАНИН

## ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

„МОДЕЛИРАЊЕ МАШИНСКИХ ТЕХНИЧКИХ СИСТЕМА КОРИШЋЕЊЕМ  
ТРАНСФОРМАЦИОНИХ МАТРИЦА”

кандидат мр Данило Т. Микић

<b>I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ</b>	
1.	Датум и орган који је именовео комисију На предлог Катедре за Машинско инжењерство, на седници Наставно – научног већа Техничког факултета „Михајло Пупин” у Зрењанину, од 15.06.2016. године донета је Одлука о именовању Комисије за оцену докторске дисертације кандидата мр Данила Микића.
2.	Састав комисије са назнаком имена и презимена сваког члана, звања, назива уже научне области за коју је изабран у звање, датума избора у звање и назив факултета, установе у којој је члан комисије запослен:
1)	Проф. др Живослав Адамовић, редовни професор, Ужа научна област: Индустриско инжењерство, 17.08.1995., Технички факултет „Михајло Пупин”, Зрењанин, Универзитет у Новом Саду, <b>председник</b>
2)	Проф. др Слободан Навалушић, редовни професор, Ужа научна област: Машински елементи, механизми, графичке комуникације и дизајн, 15.06.2006., Факултет техничких наука, Нови Сад, Универзитет у Новом Саду, <b>члан</b>
3)	Доц. др Блажа Стојановић, доцент, Ужа научна област: Машинске конструкције и механизација, 12.11.2013., Факултет инжењерских наука, Крагујевац, Универзитет у Крагујевцу, <b>члан</b>
4)	Проф. др Момчило Бјелица, редовни професор, Ужа научна област: Математика, 04.04.2003., Технички факултет „Михајло Пупин”, Зрењанин, Универзитет у Новом Саду, <b>члан</b>
5)	Доц. др Елеонора Десница, доцент, Ужа научна област: Индустриско инжењерство, 08.10.2011., Технички факултет „Михајло Пупин”, Зрењанин, Универзитет у Новом Саду, <b>ментор</b>
<b>II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ</b>	
1.	Име, име једног родитеља, презиме: Данило, Тодор, Микић
2.	Датум рођења, општина, држава: 20.03.1957., Пећ, Србија
3.	Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија – мастер и стечени стручни назив
4.	Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија
5.	Назив факултета, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране: Технички факултет-Чачак, „Механичко моделирање антропоморфних робота”, Механика машина, 31.3.2005.
6.	Научна област из које је стечено академско звање магистра наука: Механика машина
<b>III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:</b> „МОДЕЛИРАЊЕ МАШИНСКИХ ТЕХНИЧКИХ СИСТЕМА КОРИШЋЕЊЕМ ТРАНСФОРМАЦИОНИХ МАТРИЦА”	

#### IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Навести кратак садржај са назнаком броја страна, поглавља, слика, шема, графикона и сл.

Докторска дисертација садржи укупно 246 страна, 81 слику, 41 табелу и 238 цитираних литературних извора. На почетку рада дати су наслов, кључна документација (на српском и енглеском језику), садржај, резиме тезе, попис слика, попис табела и номенклатура (укупно 22 стране), а основни текст - увод, методолошки концепт, преглед досадашњих истраживања предметне проблематике, идентификација кључних параметара истраживања, анализа и дискусија резултата истраживања, закључак и литература, садржи 224 стране. Садржај докторске дисертације је структуриран у 10 поглавља:

1. Увод
2. Досадашња истраживања
3. Методолошки концепт
4. Математичко моделирање индустријских робота и формирање трансформационих матрица
5. Моделирање индустријских компресора и формирање трансформационих матрица
6. Моделирање пумпних постројења и формирање трансформационих матрица
7. Предложени модели поузданости и дијагностике сложених техничких система
8. Резултати истраживања
9. Закључак
10. Литература

#### V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Дисертација се бави проблематиком формирања математичког модела матрица, као и избором најзначајнијих параметара стања машинско-техничких система. Научни допринос дисертације огледа се у систематизованом прегледу метода као и избору одговарајућих параметара стања који учествују у формирању датог модела матрица. Значај ове дисертације јесте и у примени метода симулације приликом избора најбољих параметара дијагностике стања. Резултат истраживања представља решавање кинематике и динамике машинских сегмената са коришћењем математичког модела матрица. Такође, представљен је и развој и верификација научно засноване методологије за оптимално одржавање машинских система. Основни задатак је правилан избор, анализа и апликација најповољнијег оптималног модела на бази системског прилаза. Њиховим праћењем и испитивањем, доказан је и степен њихове поузданости. Симулацијом се може предвидети понашање појединих делова система, односно, верификација модела.

Вредност првог поглавља „Уводни део” огледа се у представљању циљева истраживања, хипотезе и примењене методологије истраживања, бави се елементарним теоријским основама, неопходним за разумевање проблема и значаја истраживања докторске дисертације. Применом параметара у поступку дијагностиковања машинских техничких система омогућава утврђивање отказа на појединим компонентама система, као и налажење критичног пута до отказа.

У ужем смислу, анализа машинских техничких система са матрицама допринела је систематизацији метода за проучавање типа функције одржавања и поузданости компонената, док се шири смисао огледа у њеној применљивости на све остале техничке системе.

Вредност другог поглавља „Досадашња истраживања” базира се на значајним објављеним радовима који се баве предметном проблематиком, а који су директно везани за сам поступак моделирања машинских техничких система са матрицама. Суштину ових радова чини појам, односно дефинисање механике (кинематике и динамике) машинских система, као и стања тих система применом математичког метода матрица.

Исцрпан и детаљан преглед стања истраживања предметне проблематике и критичка анализа литературних извора указује на добро познавање проблематике. Овај кратак приказ литературе представља образложење ставова о предмету истраживања где су изнете основне карактеристике модела и наведена њихова ограничења.

Вредност трећег поглавља „Методолошки концепт” огледа се у истраживању проблема, односно, предмета, циља, хипотеза, методологије, организације и научно-друштвене оправданости истраживања. Сама методологија дефинише и врши изналажење модела прорачуна, као и проверу параметра стања компоненти машинских техничких система (робот-манипулатор, клипни компресор, пумпа). Циљ истраживања у предложеној теми је да се у методолошком смислу, теоријски и експериментално, испита хипотеза о релацијама за препознавање типа одржавања машинских система, као и стања компоненти машинских система на математичком моделу матрица.

У оквиру четвртог поглавља **„Математичко моделирање индустријских робота и формирање трансформационих матрица”** вредност се огледа у формирању математичког модела посматраног робота *Fanuc M16iB*, који се налази у предузећу „Металац” Горњи Милановац. Описане су карактеристике кретања сегмената система, а потом се приступило решавању кинематике и динамика робота са шест степена слободe. Развијена кинематика и динамика робота, у поређењу са сличним машинама, огледа се у једноставношћу прорачуна, у већој поузданости и крутости, као и већем и правилном коришћењу радног простора. Датим једначинама трансформације матрица димензије  $4 \times 4$ , приказан је математички модел робота. На основу дефинисаних једначина матрица модела робота, извршене су симулације кретања, као и континуално кретање по унапред дефинисаној путањи. За анализу моделирања и симулацију коришћен је алат „*Matlab-Simulink and Robotics toolbox*”; а за креирање модела робота у *Matlab*-у дефинисани су параметри матрице према Денавиту Хартенберговој нотацији.

У оквиру петог поглавља **„Моделирање индустријских компресора и формирање трансформационих матрица”** представљен је један општи модел клипног компресора са једним цилиндром „*Трудбеник*”-Добој који је у примени у „Енергетици” Крагујевац, на коме је примењена кинематичка анализа механизма изведена посебном математичком методом матрица трансформација. Развијен је савремени метод са рачунарски потпомогнутим посебним софтвером за анализу обраде, који може симулирати не само кретање механизма, већ може одредити и положај, брзину, убрзање, силе, моменте и друге параметре у сваком тренутку времена. На основу добијених резултата, посебном техником математичког моделирања применом матрица трансформације, одређени су поједини проблеми кретања клипа, клипњаче и коленастог вратила. Представљени математички модел је основа за развој и примену различитих софтвера за симулацију и оптимизацију рада компресорских система.

Добијене једначине у овом поглављу приказују матрицу димензије  $3 \times 3$ , односно, међусобну повезаност између три променљиве, приказане матричним производом мање димензије стандардизоване матрице података. Вектори врста матрице података смештају се у тродимензионални простор, и на основу једначина представљају сегмент конкретне примене представљеног модела. Описани су основни приступи, предности и недостаци презентованих решења. Добијени резултати могу се упоредити уколико су коришћени исти улазни параметри. Валидација резултата модела компресора спроведена је уз помоћ резултата постојећег једноцилиндричног компресора помоћу софтвера *FluidSim 3.6*.

Вредност шестог поглавља **„Моделирање пумпних постројења и формирање трансформационих матрица”** огледа се у представљању решавања матричних једначина цевних система пумпе. Разматрано је увођење математичког модела пумпе као комплексног система, која је у вези са цевним и прикључним системима. Формирани модел је анализирао кинематику и динамику кретања радног флуида у оквиру пумпног постројења са Њутновим једначинама, као и Ојлер-Бернулијевом једначином и њиховим решењима. Добијене вредности механичке анализе и одређени програмски поступци омогућују да се у аутоматизованом режиму рада изврши механичка (статичка, кинематичка и динамичка) анализа посматраних модела у условима који одговарају условима експлоатације. За анализу су биле неопходне аналитичке методе прорачуна које се могу још базирати на теорији механике флуида. Датим једначинама утврђена је примена аналитичких метода код цевних машинских елемената. Једначинама кретања флуида код цеви добија се матрица независна од фреквенције и дужине цеви, која користи тачна решења једначина односно функција при вибрирању компонената система. Гранични услови код одзива система могу бити изражени у матричном облику, што је погодно за коришћење граничних услова матрице, да би се применило стање вектора, који зависе од укупне динамике кретања система. Представљен је модел трансформационих матрица за предвиђање динамичког понашања тродимензионалног цевног система, који је заснован на квази једнодимензионалном опису правог цевовода, где су изведене једначине које одређују млаз течности као понашање код праве цеви из тродимензионалне једначине. Добијени укупни резултати чине мноштво диференцијалних једначина првог реда и могу се груписати у четири независна скупа заједно са једначинама које описују кретање у различитим равнима. Модели једначина описују притисак, таласе течности, екстензионална савијања и турбулентне таласе у цеви (као што су ширење течности, величине вибрације).

Математички модел матрица цевних система обухвата зависну корелацију између сила које настају у правим цевима и у кривим цевним системима са и без примене параметара стања система. Општа форма аналитичког модела директно следи из динамике кретања система флуида, што

представља комплексну анализу, што је општом матрицом тешко анализирати. Датом методом једначина омогућују се бржи прорачун кретања система као и анализа кинематике, динамике, механичке стабилности радне течности и деформација изазване спољним силама, загревањем, и другим појавама. Добијени математички модел матрица је показао висок степен рационалности, високу поузданост у раду, а нарочито тачност резултата прорачуна. Допринос ове методе је у компактношћу приказа математичког модела користећи матрице, које у овом облику омогућавају компјутерске симулације динамике система и релативно лаког начина приказивања. Тако истраживани систем и добијене линеаризације модела, математичког модела матрица у облику системског простора цевних система је оправдан.

Вредност седмог поглавља **„Предложени модели поузданости и дијагностике сложених техничких система”** базира се на предложеним математичким методама провере исправности, радне способности и функционалности техничких система. Представљени су теоријски аспекти праћења дијагностичких параметара техничких система: брзине вибрација (вертикалне, хоризонталне и аксијалне) и температура, као и могућности пружања дијагностике одступања у функцији формирања математичког апарата који омогућава формирање матрица трансформација. Из описа поступка дијагностичких параметара, указује се на међусобну повезаност четири променљиве, тако да координате почетног модела бивају трансформисане у облику хомогених координата више пута док се не формира коначна матрица  $4 \times 4$ .

За анализу је предложен алгоритам за генерисање јединственог дијагностичког критеријума техничких система који је један од најефикаснијих приступа у формирању општег критеријума „оптимална” скаларизација. Формирани модел за анализу узима две групе компоненти система у добром стању и у веома лошем стању. Формирање „најбоље” скаларизације заснива се на замени вектора скаларом. Практичну примену замене вектора дијагностичких критеријума скаларом представљен је став Фишера да се посредством вектора изрази став средњих вредности матрице коваријанси.

Након спроведених истраживања параметара, за време ремонта је направљена детекција грешака компоненти система. На основу резултата истраживања су представљене вредности четири дијагностичка критеријума (V-вертикалне вибрације, H-хоризонталне вибрације, A-аксијалне вибрације и t-температура), и спроведене су грешке на утврђеним компонентама система. На основу добијених мноштва дијагностичких карактеристика формирана је матрица  $4 \times 4$  за две групе објекта у добром стању и у лошем стању.

Практична примена наведених теоретских истраживања у оквиру докторске дисертације презентована је на спроведеној математичкој анализи дијагностике сложених машинских система са применом решења матрица. Применом метода матрица, може се предвидети тренутак правовремене замене компоненте пре него што дође до њеног отказа. Помоћу модела матрица може се извршити правовремена провера постојећих параметара стања компонената и упоредити са жељеним стањем поузданости нових компонената. Математички модел матрица је дефинисан на бази датих вредности и обухвата корелацију параметара дијагностике стања машинских система, корелација параметара радних температура, вибрације и похабаности елемената машинских система. На основу утврђене корелације, извршена је анализа модела кроз емпиријска истраживања.

У оквиру осмог поглавља **„Резултати истраживања”** представљене су вредности резултата истраживања, која су практично примењена на теоретским аспектима формирања математичког модела матрица трансформација. Ови параметри, као променљиве, међусобно су повезани и трансформишу се у облику хомогених координата за формирање матрица трансформација. Добијени резултати ових истраживања представљају научни и друштвени допринос предметној проблематици. Извршена теоретска и емпиријска истраживања омогућила су проверу и доказивање главне хипотезе, као и постављених помоћних хипотеза. Примена модела матрица омогућава једноставно одређивање оптималне вредности стања компонената машинских система. Резултати добијени моделом матрица показују да све корелације у експлоатационим условима зависе од параметара, као и од понашања посматраних компонената на систему. Узети параметри, који су анализирани са методом матрица, и који се испољавају кроз побољшање одржавања, и спречавање отказа компоненти система, бележе смањење трошкова техничког одржавања више од 2 пута што оправдава њихово увођење.

На вредност поглавља девет **„Закључак”** стављен је акценат на анализу кључних параметара који утичу на моделирања кретања појединих сегмената машинских техничких система. Такође, помоћу анализе једначина трансформационих матрица и дефинисање кључних параметара при

кинематичким и динамичким условима рада, анализирани су зависности стања машинских техничких система. Анализирани су резултати који су добијени применом решавања система једначина методама матрица. У ту сврху је уведен појам строге дијагоналне доминације и помоћу њега је извршена карактеризација матрица техником трансформације. Потом је техника трансформације приказана као алат помоћу кога се може извршити класификација матрица. Примењено је више математичких модела са матрицама трансформације, како би се добиле оптималне вредности одржавања машинских система. При механичким прорачунима (робота, компресора, пумпе) метод коришћења матрица је оправдан, оптималан, ефикасан и једини применљив метод. Овако добијени резултати спроведени на сложеним техничким системима могу се успешно користити у даљим етапама прорачуна техничких система. Све већи број реалних проблема у области машинске технике и шире, данас се решава математичким моделирањем, захваљујући пре свега интензивном развоју рачунарске технике. Уместо да се врши велики број експеримената, што је често дуг и скуп пут, формира се математички модел којим се симулира одређени процес или појава. Будућа анализирања проблематике моделирања, одржавања и поузданости машинских система треба усмерити у правцу нових научних и техничких достигнућа.

У оквиру овог поглавља детаљно су представљена потпоглавља: научни допринос дисертације и доказивање (поткрепљивост) главне хипотезе.

Циљ истраживања у предложеној теми био је усмерен на математичком моделирању машинских техничких система применом матрица, у циљу дефинисања поузданости одржавања.

#### ***Научни допринос дисертације:***

Допринос теоретских истраживања у оквиру докторске дисертације првенствено се огледа на спроведеној анализи математичког моделирања машинских техничких система са матрицама, као и спровођењу мера дијагностике поузданости заснованој на броју извођења ремонтних мера. Допринос истраживања, такође, се огледа и у добијеним резултатима истраживања, који су потврдили тачност постављених хипотеза и представљају значајан научни допринос, који се огледа у следећем:

- Развијен је нови дијагностички модел компоненти стања техничких система са коришћењем матрица;
- Формализована је процедура за вишекритеријумско оцењивања сложених система коришћењем параметара вибрација, тако да створени математички апарат оптималне скаларизације развија одговарајуће алгоритме;
- Развијен је сопствени модел за прорачун поузданости сложених техничких система. Прорачун показатеља поузданости вршен је коришћењем аналитичких и емпиријских релација, помоћу методе бинарне логистичке регресије. Прорачуном је испитивано да ли процењена вредност  $u_j$ , односно, да ли њена апсолутна вредност  $|u_j|$  заиста утиче на појаву отказа на системима.

#### ***Доказивање (поткрепљивост) главне хипотезе:***

Научно истраживање у оквиру докторске дисертације имало је за циљ математичко моделирање машинских техничких система као и бржи и једноставнији начина пројектовања применом метода прорачуна, коришћењем трансформационих матрица. Циљ је био усмерен на откривање раних узрока промене дијагностичких параметара на компонентама машинских система, као и утицај појединих експлоатационих параметара рада на поузданост компонента машинских система засновани на матрицама трансформација.

У складу са наведеним циљем и на основу извршених теоретских и експерименталних истраживања на машинским техничким системима, хипотеза под називом: „Коришћењем поступака моделирања машинских техничких система помоћу трансформационих матрица може се доћи до једноставнијег и бржег начина пројектовања истих”, потврђена је.

Постављени циљ остварен је доказивањем следећих помоћних хипотеза:

- Хипотеза под којим истраживање поузданости машинских техничких система омогућава ефикасније управљање дијагностике, као и увођење предложених побољшања за повишење нивоа поузданости машина у целини, односно унапређује економску ефикасност посматраних машинских система, је потврђена.
- Хипотеза по којој примена расположивих техничких одржавања може утицати на повишење поузданости система и обезбеђење оптималних захтева спровођења метода теорије и технике у експлоатацији техничких система, потврђена је.

У оквиру десетог поглавља „*Литература*”, вредност се односи на таксативно навођење коришћених референци, уз констатацију да је наведена литература адекватна и актуелна. Од укупног броја коришћених извора у дисертацији доминира међународна литература. Комисија је позитивно оценила наводе литературе и изворе података у дисертацији.

**Мишљења смо да су сви делови дисертације обрађени на високом научно истраживачком нивоу, као и да је дисертација написана систематично и јасно. На основу прегледаног рада, закључујемо да докторска дисертација кандидата мр Данила Микић представља оригиналан допринос науци.**

#### **VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ**

Таксативно навести називе радова, где и када су објављени. Прво навести најмање један рад објављен или прихваћен за објављивање у часопису са ISI листе односно са листе министарства надлежног за науку када су у питању друштвено-хуманистичке науке или радове који могу заменити овај услов до 01. јануара 2012. године. У случају радова прихваћених за објављивање, таксативно навести називе радова, где и када ће бити објављени и приложити потврду о томе.

##### **Рад у међународном часопису - M23**

- [1] **Mikić, D.**, Desnica E., Ašonja, A., Stojanović, B. (2015). Reliability analysis of ball bearing on the crankshaft of piston compressors, Journal of the Balkan Tribological Association, Vol.22, No.4, pp. (ISSN: 1310-4772) - paper is accepted
- [2] Desnica E., Ašonja, A., **Mikić, D.**, Stojanović, B. (2015). Reliability of model of bearing assembly on an agricultural of Cardan shaft, Journal of the Balkan Tribological Association, Vol.21, No.1, pp.38-48. (ISSN: 1310-4772) ; (IF za 2014. 0,443)
- [3] Ašonja, A., **Mikić, D.**, Stojanović, B., Gligorić, R., Savin, L., Tomić, M. (2013). Examination of Motor-Oils in Exploitation at Agricultural Tractors in Process of Basic Treatment of Plot, Journal of the Balkan Tribological Association, No.2, Vol.19, pp.314-322. (ISSN: 1310-4772) ; (IF za 2013. 0,321)
- [4] **Mikić, D.**, Ašonja, A., Gligorić, R., Savin, L., Tomić, M. (2012). Dynamic Solving of Rotational Transformation Matrix Using the D'ALAMBER Principle, TTEM - Technics Technologies Education Management, Vol.7, No.3, pp.1187-1195. (ISSN: 1840-1503); (IF za 2012. 0,414)

##### **Рад у водећем часопису националног значаја - M51**

- [1] Stefanović, S., **Mikić D.**, Golubović, D., Ilić, D. (2013). Modeling and simulation of robot kr 80 series based on matlab software program, Faculty of Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering, Tome XI, fascicule 3, (ISSN1584-2673), pp.161-168.
- [2] Desnica, E., **Mikić D.** (2014). Various approaches to kinematic analysis in the process of design of piston mechanisms, Faculty of Engineering Hunedoara, Acta Tehnica Corviniensis – Bulletin of Engineering, Tome VII, Fascicule 2 (April-June), pp.63-68, ISSN: 2067 – 3809
- [3] Ašonja, A., **Mikić, D.**, Desnica, E., Adamović, Ž., Justifiability of execution of serbian teleservice in industry, Acta Tehnica Corviniensis – Bulletin of Engineering, Tome VIII (2015), Fascule 3 (July-September), pp. 77-79, (ISSN 2067 – 3809)
- [4] **Mikić D.**, Desnica, E., Ašonja, A., The geometric analyzes of sized bearing in exploitation, Acta Technica Corviniensis - Bulletin of Engineering, Tome IX (2016), Fascicule 2(Apr-Jun), pp. 29-32, (ISSN: 2067 – 3809)

##### **Рад у часопису националног значаја - M52**

- [1] Ашоња, А., Адамовић, Ж., Глигорић, Р, **Микић Д.** (2012). Развој модела лабораторијског стола за испитивање поузданости пољопривредних карданских вратила, Техничка дијагностика, Vol.11, No.3, 27-32. (ISSN: 1451-1975)
- [2] Ашоња, А., Пастухов А. Г., Глигорић, Р., **Микић, Д.** (2012). Анализа поузданости карданских зглобова на пољопривредним машинама, Трактори и погонске машине, Vol.17, No.2/3, 85-92 (ISSN: 0354-9496) ; (UDK 631.372)
- [3] Ашоња, А., Адамовић, Ж., Јањић, З., **Микић, Д.** (2013). Техничко решење електричне кочнице „ЕК” 6/28 на лабораторијско-опитном столу за испитивање механичких преносника снаге, Научно-стручни часопис Техничка дијагностика, Vol.5, No.1-2, 2-7. (ISSN: 1840-4898)
- [4] **Mikić, D.**, Ašonja, A., Desnica, E. (2013). Optimization of Movement Mechanism Using the Transformation Matrix, Tecnical Diagnostics, Vol.12, No.4, 22-30. (ISSN 1451-1975)

[5] **Микић, Д.**, Десница, Е., Ашоња, А. (2014). Кадрови-окосница одржавања техничких система, Научно-стручни часопис Техничка дијагностика, Vol.6, No.3-4, 4-10. (ISSN 1840-4898)

**Рад у научном часопису, М53**

[1] Ашоња, А., Адамовић, Ж., Глигорић, Р, **Микић Д.** (2013). Развој модела лабораторијског стола за испитивање поузданости пољопривредних карданских вратила, Одржавање машина, Vol.10, No.1-2, 60-66. (ISSN: 1452-9688)

**Саопштење са међународног скупа штампано у целини, М33**

[1] Desnica, E., **Mikić, D.**, Ašonja, A., Adamović, Ž. (2012). Mechanical Modeling of Industrial Machines, II International Conference - Industrial Engineering and Environmental Protection 2012 (IIZS 2012), pp.185-191, 31 October 2012, Zrenjanin, Serbia. (ISBN: 978-86-7672-184-9)

[2] Stefanovic S., Janjic Z., Adamović Ž., **Mikić D.**, Construction foundations of modeling robot - manipulators with five degrees of freedom, II International Conference Industrial Engineering And Environmental Protection 2012 (IIZS 2012) Oktober 31<sup>st</sup>, pp.297-305, 2012, Zrenjanin, Serbia

[3] **Mikić, D.**, Desnica, E., Ašonja, A., Krunic, V., Krunic, M., Petrović, D. (2013). Mathematical Modeling of Compressors, 13<sup>th</sup> International Conference Research and Development in Mechanical Industry RaDMI 2013, Vol.2, 12 - 15 September, Kopaonik, Serbia, pp.854-861. (ISBN: 978-86-6075-017-6).

[4] **Mikić, D.**, Desnica, E. Ašonja, A., Adamović, Ž. (2013). Kinematics of Piston Mechanism with the Use Rotating Transformation Matrix, III International Conference - Industrial Engineering and Environmental Protection 2013 (IIZS 2013), 30 October 2013, Zrenjanin, Serbia, pp.187-193. (ISBN: 978-86-7672-184-9)

[5] Krunic, V., Ašonja, A., Krunic, M., **Mikić, D.**, Četić N. (2013). Software for Automatic Control of Laboratory Analysis, 13<sup>th</sup> International Conference Research and Development in Mechanical Industry RaDMI 2013, Vol.2, 12-15 September, Kopaonik, Serbia, pp.688-694. (ISBN: 978-86-6075-017-6)

[6] **Mikić, D.**, Desnica, E., Ašonja, A., Adamović, Ž. (2014). Monitoring the State of the Technical o System in the Exploitation, IV International Conference Industrial Engineering And Environmental Protection 2014 (IIZS 2014), 15th October, 2014, Zrenjanin, Serbia, pp.179-188. (ISBN: 978-86-7672-234-1)

**Саопштење са скупа националног значаја штампано у целини, М63**

[1] **Микић, Д.**, Ашоња, А., Десница, Е., Адамовић, Ж., Петровић, Д. (2013). Геометријски приказ структуре радног простора индустријских робота, Зборник радова - XXXVI Конференција Мајски скуп одржавалаца Србије „Мерење индикатора перформанси одржавања”, Друштво за техничку дијагностику Србије, 31. 05.2013., Врњачка Бања, 38-45. (ISBN 978-86-83701-30-8)

[2] **Микић, Д.**, Десница, Е., Ашоња, А., Адамовић, Ж., (2014). Одржавање и дијагностика лежајева на пумпним постројењима, Зборник радова - XXXVII Конференција мајски скуп одржавалаца србије „Нова концепција одржавања: вибродијагностичко одржавање техничких система у компанијама”, Друштво за техничку дијагностику Србије, 30.05.2014, Врњачка Бања. (ISBN 978-86-89087-12-3)

[3] **Микић, Д.**, Десница, Е., Ашоња, А., Петровић, Д., Адамовић, Ж. (2015). Математичко моделирање у процесу пројектовања и анализе механизма, XV Конференција „Техничка дијагностика машина и постројења”, Друштво за техничку дијагностику Србије, 30. 10. 2015. Врњачка Бања. (ISBN 978-86-83701-38-4)

[4] **Микић, Д.**, Десница, Е., Ашоња, А., Петровић, Д., Адамовић, Ж. (2015). Примена рачунара за анализу и детекцију параметара у процесу одржавања техничких система, XV Конференција „Техничка дијагностика машина и постројења”, Друштво за техничку дијагностику Србије, 30. 10. 2015. Врњачка Бања. (ISBN 978-86-83701-38-4)

**VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА**

Грађа у оквиру докторске дисертације представља стваран допринос истраживања у области математичког моделирања машинских техничких система, као и одржавања и поузданости са акцентом на примену матрица. У оквиру ње презентована су бројна истраживања публикована на међународном нивоу на пољу теоретских и експерименталних истраживања. Проблематика истраживања моделирања машинских техничких система, као и дијагностика техничких система, веома је актуелна у свету, заокупљајући тако све већу пажњу научне и стручне јавности, јер се ради о подручју где се преплиће више научних области, што јој даје мултидисциплинарни карактер. На основу научних, физичких, механичких, материјалних и других доказа презентованих у оквиру ове дисертације, намеће се констатација да се овој проблематици не придаје значајна пажња у пракси.

На основу прегледа бројне литературе, извршених теоретских, експерименталних истраживања на испитивању машинских техничких система, хипотеза под називом: „Коришћењем поступака моделирања машинских техничких система помоћу трансформационих матрица може се доћи до једноставнијег и бржег начина пројектовања истих”, потврђена је.

Докторска дисертација је писана у методолошком смислу на основу два приступа: теоријског и експерименталног. Истраживања у докторској дисертацији довела су до резултата који потврђују оправданост избора проучаване проблематике. Научно засноване методе које су коришћене у решавању предмета докторске дисертације омогућиле су у теоријском делу да се анализирају математички и други модели који разматрају проблематику избора кретања појединих сегмената машинских система, као и праћења параметара стања компоненти и функције поузданости машинских система. Резултати истраживања математичких модела кретања сегмената система решавани су са моделом матрица, а други модели који разматрају проблематику стања и поузданости обухваћену дисертацијом реализовани су са системом матричних једначина. Ови модели показују да је акценат на избору најбољих параметара и вредности корелације параметара и похабаности компоненте машинског система. Успешно је спроведена анализа модела кроз емпиријско истраживање, самим тим се одређује и област оптималних параметара дијагностике стања у којима саставне компоненте имају сигуран рад, тј. рад без ризика.

Осим наведених кључних резултата истраживања и образложења анализе добијених резултата, у оквиру ове дисертације наводе се и моделирања техничких система математичким моделом матрица и утицаји појединих експлоатационих параметара рада и коришћење различитих метода дијагностике машинско-техничких система.

Може се закључити да се поступак сложености конструисања техничких система (робота, компресора и пумпе) огледа у решавању кинематике и динамике и решавању система управљања. Ове етапе су подједнако значајне за коначно решење техничких система. Свакако да је решавање механике механизма техничких система једно од основних проблема и стога је увек актуелно, посебно за конкретне случајеве.

Ова дисертација представља један конкретан допринос развоју методологије решавања механике (робота, компресора, пумпе), па се даље наводе неки од закључака до којих се дошло при истраживању.

1. На основу извршене анализе општих проблема која се јављају при коришћењу кинематичких и динамичких принципа у изучавању техничких система, закључено је да се решавање кретања (робота, компресора и пумпе) своди на решавање механике сложених (релативних) кретања система тела која се састоје у следећем:

- Дефинисању параметара кретања, односно, одређивању генерализаних координата и дефинисању основних матрица трансформације;
- Одређивању положаја појединих карактеристичних тачака, тзв. одређивању закона кретања, односно одређивању брзина и убрзања појединих карактеристичних тачака (линијских и угаоних);
- Одређивању спољашњих и унутрашњих сила и момента (силе и моменти у карактеристичним местима), формирању динамичких једначина кретања и др.

Сви наведени параметри (робота, компресора, пумпе) неопходни су за пројектовање, а нарочито за решавање система управљања. Анализирајући реалне моделе истраживаног робота *Fanuc*, компресора *Трудбеник*, пумпе *Јастребац*, који представљају техничке системе са више степени слободе, констатовано је да се ради о техничким системима чија је структура таква да се реализује више степени слободе кретања и исто толико управљајућих погонских мотора. Из ове анализе је изведен закључак да су анализирани модели врло сложени и да је класичним механичким прорачунима веома тешко решити њихова кретања, одредити силе и моменте неопходних за управљање. Зато је за решење оваквих модела прихваћен модерни метод механичких прорачуна коришћењем матрица трансформација.

2. Потом, дат је општи преглед механике робота са коришћењем матрица трансформација, посматрајући технички системе као систем кругих тела-сегмената зглобно везаних у отвореном кинематичком ланцу, којим је обухваћено следеће:

- Општа дефиниција матрице трансформације;
- Дефинисање матрица трансформација око оса;
- Одређивање положаја сегмената и карактеристичних тачака;
- Одређивање брзина и убрзања сегмената и карактеристичних тачака (линијских и угаоних);
- Одређивање сила и момента сегмената моделирањем динамичких једначина.



Наведена методологија примене матрица трансформација за решавање механике (робота, компресора и пумпе) омогућила је формирање матричних механичких прорачуна, што је практично изводљиво коришћењем рачунара. Тиме је превазиђен основни проблем класичних механичких прорачуна.

3. У поглављима 4, 5, 6 дато је Моделирање техничких система (робота, компресора и пумпе), где су практично анализирани системи који су узети као модели који представљају механизме са више степени слободe кретања. Поред анализе конструкционих параметара дати су и параметри неопходни за механичко моделирање кретања машинских техничких система, као што су: ограничења кретања, погонски и сензорски системи и др. Као основна верификација дате теорије приказана је у поглављима 4, 5, 6 примена матрица трансформација, која се огледа у следећем:

- Дефинисане су и симулиране основне матрице трансформација за робот;
- Дефинисани су положаји карактеристичних тачака сегмената коришћењем матрица трансформација за модел робота;
- Дефинисане су брзине и убрзања карактеристичних тачака и сегмената коришћењем матрица трансформација за модел робота, као и модела компресора и пумпе;
- Дато је решење кретања робота, као и кретање клипа, клипњаче и коленастог вратила компресора, као и статичко оптерећење вратила пумпе, и дефинисане су и симулиране основне матрице трансформација.

Поред тога, извршена је верификација модела кинематике робота симулирањем у Matlab-у, коришћењем програма SimMechanics.

Претходно добијени резултати истраживања са аспекта верификације модела робота, као њене најзначајније карактеристике, омогућују бројне анализе применом софтвера од којих су од посебног интереса оне које воде ка оптималним решењима. Могућност симулације понашања робота пружа велике шансе за усавршавање процеса пројектовања. Примећено је да је могуће брзо анализирање понашања великог броја различитих конфигурација робота ради избора најповољнијег. Такође, могуће је и испробати разне управљачке шеме, разне вредности параметара итд.

У поглављу 5 представљен је један општи модел клипног компресора са једним цилиндром, кинематичка анализа механизма, која је изведена посебном математичком методом матрица трансформација који се користи у индустрији. Посебан осврт је дат на кинематичку анализу механизма и истраживање кретања појединих компоненти механизма и његових важних тачака. Такође, симулација и верификација постојећег модела клипног механизма вршена је у софтверском програму FluidSim 3.6. У истом програму урађена је пнеуматска и електрична шема клипног компресора.

При истраживању математичких поступака моделирања техничких система дато је извођење итеративних поступака решавања система линеарних једначина где се користе матричне форме, као и тврђења о векторима и матрицама. Аналитичке методе прорачуна и анализе код пумпи заснивају се на изналагању тачних решења диференцијалних једначина којима се описују одређени гранични проблеми. Ови сложени гранични проблеми не могу да обухвате решења свих кретања сегмената пумпних система, јер матрична форма има своја ограничења. Наведено указује да се разматрана структура или уопште неки домен као непрекидна величина са бесконачно много степени слободe, замењује дискретним моделом са међусобно повезаним коначним елементима са коначним бројем степени слободe. Стога, решење одређеног проблема своди се у подручје алгебре, односно, на решење одговарајућег дискретног система. Прорачун методом коначних елемената подразумева решавање матричних једначина, а своди се на решавање система једначина са великим бројем непознатих величина. Класичним путем се могу решити крајње једноставни проблеми (од неколико коначних елемената), док се за сложенији проблем морају користити рачунари.

На основу извршених истраживања и свега изложеног можемо закључити следеће:

- При механичким прорачунима техничких система метод коришћења матрица трансформација је оправдан, оптималан, ефикасан;
- За сложеније случајеве је једини применљив метод;
- До резултата се брзо долази захваљујући могућношћу коришћења развијених и моћних рачунара;
- По свом карактеру добијени резултати овако спроведеног механичког прорачуна могу се успешно користити у даљим етапама прорачуна техничких система и
- Примењена методологија може користити и у једноставније инжењерске сврхе.

Допринос експерименталних истраживања у оквиру докторске дисертације јесте у томе што су представљени резултати истраживања који поткрепљују и подробније објашњавају дефинисане хипотезе и помоћне хипотеза.

Представљени резултати истраживања указали су на то да су компоненте на склоповима машинских система најкритичнији елементи и да су потенцијални узроци смањења поузданости истих. Њихови параметри су представљени у виду вектора и потврђени коришћењем матрица трансформације. Анализа методологије матрица трансформације и статистичка решења, која су спроведена у оквиру ове дисертације разоткрила су низ озбиљних препрека за практичну примену овог математичког апарата за практично решавање проблема дијагностике сложених система у раду. Матрице трансформација огледају се у значају метода мешовите стратегије поузданости сложених машинских система, као и одржавања у зависности од трошкова њиховог одржавања и ремонта. Међутим, избор методе за решавање вишекритеријумског задатка указала је на сва сазнања о проблему који треба систематизовати у матрицу одлучивања и извршити њену трансформацију у матрицу података прилагођену за примену изабране методе.

Анализа постојећих репрезентативних типова конструкције техничких система указала је да на њихову ефикасност доминантан утицај имају режим рада и топлотни губици који зависе од геометријских карактеристика, као и радних карактеристика система. Може се закључити да се конструктивни параметри не могу у циљу повећања ефикасности посматрати независно од радних параметара, нити радни параметри независно од конструктивних јер су у интеракцији једни са другима. Резултати спроведених истраживања вредности основних параметара, као и параметара конструкције, који утичу на повећање ефикасности, могу се применити на све типове других машинских система, осим за сличне случајеве.

Резултати истраживања добијени симулацијом и експериментом потврђују теоријске претпоставке да се одржавањем може повећати ефикасности посматраних техничких система. Приступ одржавања сложеног модела техничких система испитиваних у дисертацији указују на неопходност да се реактивно одржавање замени проактивним одржавањем, које се заснива на максималној примени превентивног одржавања.

Истраживања спроведена у оквиру израде докторске дисертације показала су сву свеукупност и значај разматрања проблематике утицаја дијагностике техничких система у експлоатацији на ниво поузданости и расположивости тих система, као и на укупне трошкове чиме је остварен конкретан допринос истраживањима у области дијагностике и одржавања техничких система.

#### **VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА**

Експлицитно навести позитивну или негативну оцену начина приказа и тумачења резултата истраживања.

Докторска дисертација написана је у складу с образложењем наведеним у пријави теме и садржи све битне елементе који су утврђени методологијом научно-истраживачког рада. У истраживањима у оквиру докторске дисертације коришћена су истраживања и анализе добијених резултата, усмерене на моделирању математичког модела матрица, као и утицај појединих експлоатационих параметара рада као и различитих метода одржавања техничких система. У погледу оригиналног научног доприноса, Комисија је констатовала:

У поднетој докторској дисертацији показани су постигнути резултати кандидата у анализи проблематике математичког модела прорачуна појединих сегмената машинских техничких система, као и дијагностике стања система, а посебно у анализи параметара стања компоненти са акцентом на матрице трансформација. Начин обраде указује на адекватан приказ и тумачење остварених резултата. На основу резултата, кандидат је правилно поставио одговарајуће хипотезе и циљеве истраживања. Затим је на бази анализе резултата развијен модел за одређивање оптималне вредности извођења дијагностике стања компоненти са матрицама. У пракси је извршена примена модела и дошло се до закључка да је модел испунио очекивања. Из тих разлога комисија сматра да је методолошко и научно истраживање, као и приказ резултата извршен у складу са очекивањима.

Уочени проблеми односе се на услове у којима се доносе одлуке о активностима које треба предузети у примени параметара стања компоненти, а са циљем предвиђања и спречавања отказа. Предложене методе, мерења, параметри, концепти, су реални и доприносе рационализацији примене модела поступака дијагностике стања и поузданости компонената машинских система.

У оквиру истраживања докторске дисертације коришћена је лабораторијска метода, методе за динамичко испитивање компоненти техничког система и методе за статистичку обраду података. За спровођење наведених истраживања коришћен је већ пројектована посебна лабораторијска опрема.

Статистички подаци су интерпретирани на више начина, у зависности од врсте и природе података, табеларно и графички. Сама анализа, прорачун и израда графикона и табела уређена је у *SPSS v.17.0* (Statistical Package for the Social Sciences) програму, као и *Microsoft Office Excel*-у и сл.

Такође, у истраживању је дат нови дијагностички модел за праћење стања компоненти машинских техничких система. Ови модели базирани су на коришћењу рачунара и других савремених информационо-комуникационих технологија, које доприносе порасту нивоа поузданости машинско-техничких система.

Излагање у овој дисертацији у потпуности је везано за циљ истраживања и сви наводи у дисертацији су везани за развој модела матрица, као и примене параметара стања компоненти и модела поступака дијагностике стања и поузданости машинских техничких система.

Начини обраде добијених резултата истраживања указују на адекватан приказ и тумачење остварених резултата. Подробнијом анализом резултата истраживања до којих је кандидат дошао може се закључити следеће: да између постављене хипотезе и предмета истраживања постоје непосредне и посредне везе, са научним циљевима хипотезе су у непосредној вези, између хипотезе и научних истраживања постоје непосредне и посредне везе и између хипотезе и научне оправданости истраживања постоји посредна веза. Основни научни допринос исказује се кроз развој модела са применом најзначајнијих параметара теоријске и експерименталне анализе. У његовом одређивању, кренуло се од укупних отказа саставних компоненти у току анализирања параметара, а њиховим међусобним утицајем и повезаношћу формира се корелација параметара система. Предложени су и алгоритми за праћење и одређивање параметара поступака дијагностике стања машинских система. У случају проактивног одржавања (идентификација и елиминација узрочника отказа) постиже се значајан допринос као и предност - уштеда у односу на постојеће стање одржавања компоненти система.

Сви делови дисертације и поглавља унутар тих делова, чине организациону целину и на један логичан начин прате све активности које су реализоване у склопу истраживања. Сва поглавља дисертације су међусобно усклађена.

Из тих разлога Комисија сматра да је методолошко и научно истраживање као и приказ резултата извршен у складу са очекивањима.

Кандидат је конципирао оригиналне моделе и у процесу истраживања дошао до оригиналних закључака, тако да се дисертација одликује оригиналношћу.

#### **IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

Експлицитно навести да ли дисертација јесте или није написана у складу са наведеним образложењем, као и да ли она садржи или не садржи све битне елементе. Дати јасне, прецизне и концизне одговоре на 3. и 4. питање:

1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме  
Докторска дисертација је, у потпуности, написана у складу са образложењем које је наведено у пријави теме.

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе  
Докторска дисертација својим насловом, садржајем, резултатима истраживања и начином тумачења тих резултата **садржи све битне елементе** који се захтевају за радове овакве врсте.

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци

Разматрајући представљену целокупну грађу докторске дисертације кандидата мр Данила Т. Микића, Комисија је закључила да докторска дисертација представља оригиналан научни допринос аутора, теорији моделирања машинских система и механизма са *трансформационим матрицама*. Оригиналан допринос дисертације науци може се представити са неколико аспекта, и то кроз: развој нових модела извођења прорачуна кроз примену матрица трансформација, и коришћењу лабораторијске опреме; приступ у праћењу општих проблема који се јављају при коришћењу кинематичких и динамичких принципа у изучавању механизма машинских система; анализи кретања система која се своди на решавање механике сложених (релативних) кретања система тела и дефинисању параметара кретања који је реализован матричним једначинама.

Приступ анализи модела је веома сложен, па је класичним механичким прорачунима немогуће решити њихова кретања, одредити силе и моменте неопходних за управљање. Зато се кандидат определио да, као базу за механичке прорачуне, код анализираних механизма машинских система примени нов механички приступ и у прорачунима користи матрице трансформације. Потврђене резултате и симулације верификације коришћених матрица за обрађивани модел са уводном напоменом о операцијама са матрицама, применио је у посебним софтверским програмима.

За потребе истраживања, односно, испитивања дијагностике стања на компонентама машинских система, коришћена је први пут убрзана метода преоптерећења на постојећем лабораторијском столу и мерна опрема.

Модели поузданости представљени у виду техничке дијагностике створени су на бази откривене законитости кретања измерених дијагностичких параметара у експлоатационим условима и на лабораторијским узорцима испитиваних компоненти. Предложен нови модели је нови приступ дијагностици стања техничких система, односно, развијен је нови дијагностички модел за праћење стања компоненти машинских техничких система. Овај модел базиран је на коришћењу рачунара и других савремених информационо-комуникационих технологија, које доприносе порасту нивоа поузданости тих система. Све наведено је потврђено практичном применом представљеног математичког модела матрица на конкретном примеру праћења стања машинских техничких система у реалним условима и различитим грана индустрије.

Оригиналност ове докторске дисертације произилази из чињенице да представља самостални рад и допринос решавању актуелне научне и стручне проблематике. Хипотезе од којих је кандидат пошао, научна методологија коју је користио у истраживању и кандидатово искуство, дале су значајне практичне резултате истраживања на овој теми, што представља кандидатов научни допринос развоја ових система. Методологија која је коришћена у истраживањима, теоријски приступ, начин верификације постављених проблема, доношење одређених закључака као и препоруке за даља истраживања указују да је кандидат овладао научним методама рада.

Дисертација је урађена на потребном научном нивоу, са резултатима који имају теоријски и практични инжењерски значај.

Истраживања у дисертацији представљају основу за даља истраживања у датој научној области.

4. Недостаци дисертације и њихов утицај на резултат истраживања  
Комисија сматра да дисертација нема недостатака.

#### **X ПРЕДЛОГ:**

На основу укупне оцене дисертације, комисија предлаже:

Наставно-научном већу Техничког факултета „Михајло Пупин” у Зрењанину да се докторска дисертација под насловом „**Моделирање машинских техничких система коришћењем трансформационих матрица**” **прихвати**, а да се кандидату мр Данилу Т. Микићу одобри јавна одбрана.

#### НАВЕСТИ ИМЕ И ЗВАЊЕ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ ПОТПИСИ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ

проф. др Живослав Адамовић, редовни професор, председник

проф. др Слободан Навалушић, редовни професор, члан

доц. др Блажа Стојановић, доцент, члан

проф. др Момчило Бјелица, редовни професор, члан

доц. др Елеонора Десница, доцент, ментор

У Зрењанину, 27.06.2016.

НАПОМЕНА: Члан комисије који не жели да потпише извештај јер се не слаже са мишљењем већине чланова комисије, дужан је да унесе у извештај образложење односно разлоге због којих не жели да потпише извештај.