

**НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У НИШУ**

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Нишу, бр. 612-596-11/2012 од 8.10.2012.године, именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације Далибора Петковића, дипл.маш.инж., под називом:

**Истраживање и развој адаптивних пасивних гибких система
са интегрисаним сензорима и актуаторима**

Након прегледа докторске дисертације, сагласно Закону о високом образовању и Статуту Машинског факултета Универзитета у Нишу, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

Подаци о кандидату

Далибор Петковић рођен је 24.01.1984. године у Лесковцу, село Горња Јајна. Завршио је Машинску школу „Раде Металац“ у Лесковцу (профил “Машински техничар за компјутерско конструисање“) 2003. године, а потом дипломирао на Машинском факултету Универзитета у Нишу (смер „Мехатроника и управљање“) 2008. године са просечном оценом 9,14. Добитник је похвалнице за најбољег студента четврте године дипломских академских студија.

По дипломирању, уписао је докторске академске студије на Машинском факултету у Нишу. Све испите предвиђене Наставним планом докторских академских студија положио је са просечном оценом 9,63. Добитник је похвалнице за најбољег студента на докторским студијама.

Још током дипломских студија обавио је једну стручну праксу у иностранству (2007. године), на Катедри за микромеханику Техничког Универзитета у Илменау, Немачка, у оквиру међународног пројекта „Мехатроника“ који је финансирао DAAD. Током овог боравка радио је на развоју тродимензионалних интегрисаних струјних кола применом ниско температурно заједничко печене керамике што је касније била и тема његовог дипломског рада.

За време докторских студија обавио је још две стручне праксе на Техничком Универзитету у Илменау, овог пута на Катедри за механизме, у оквиру билателарног пројекта између Републике Србије и Савезне Републике Немачке „Развој метода за пројектовање функционалних гибких механизма и интеграцију сензора у гippe механизме“. У оквиру првог боравка (2010. године) радио је на развоју пасивног роботског зглоба са интегрисаним сензорима што представља први од глобалних резултата приложене докторске дисертације. У оквиру другог боравка (2011. године) радио је на развоју адаптивних гибких пасивних роботских хватача са интегрисаним сензорима и актуаторима што представља други глобални резултат докторске дисертације.

Као стипендиста-докторант Министарства за просвету и науку Републике Србије био је учесник једног научно-истраживачког пројекта из области технолошког развоја, а

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ У НИШУ

Пријемни			
03. 12. 2012			
Срг. ред.	Број	Пројект	Вредност
1	612-754	/12	

тренутно је учесник научно-истраживачког пројекта у оквиру програма интегралних и интердисциплинарних истраживања (ИИИ).

У току докторских студија држао је вежбе из неколико предмета на дипломским академским студијама.

Кандидат је до сада објавио 16 радова:

Радови у врхунским међународним часописима (M21):

1. **Petković, D., Issa, M., Pavlović, N.D., Pavlović, N.T., Zentner, L.: Adaptive neuro-fuzzy estimation of conductive silicone rubber mechanical properties**, Expert Systems with Applications, Vol. 39 (2012), 9477-9482.
2. **Petković, D., Issa, M., Pavlović, N.D., Zentner, L., Čojbašić, Ž.: Adaptive neuro fuzzy controller for adaptive compliant robotic gripper**, Expert Systems with Applications, Vol. 39 (2012), 13295-13304.
3. **Petković, D., Pavlović, N.D., Čojbašić, Ž., Pavlović, N.T.: Adaptive neuro fuzzy estimation of underactuated robotic gripper contact forces**, Expert Systems With Applications, Vol. 40 (2013), 281-286.
4. **Petković, D., Issa, M., Pavlović, N.D., Zentner, L.: Intelligent Rotational Direction Control of Passive Robotic Joint with Embedded Sensors**, Expert Systems with Applications, Vol. 40 (2013), 1265-1273.

Радови у истакнутим међународним часописима (M22):

5. **Petković, D., Issa, M., Pavlović, N.D., Zentner, L.: Application of the TRIZ creativity enhancement approach to design of passively compliant robotic joint**, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, DOI: 10.1007/s00170-012-4530-4, Online First.

Радови у међународним часописима (M23):

6. **Petković, D., Čojbašić, Ž.: Adaptive neuro-fuzzy estimation of automatic nervous system parameters effect on heart rate variability**, Neural Computing & Application, DOI: 10.1007/s00521-011-0629-z, Online First;

Радови у монографијама међународног значаја (M14):

7. **Petković, D., Pavlović, D. N.: A New Principle of Adaptive Compliant Gripper**, Mechanisms, Transmission and Applications, Mechanisms and Machine Science, Vol. 3, 2012, XVI, Springer, ISBN 978-94-007-2726-7, 143-150.
8. **Petković, D., Issa, M., Pavlović, N.D., Pavlović, N.T., Zentner, L.: Passively Adaptive Compliant Gripper**, Applied Mechanics and Materials, Vol. 162 (2012), 316-325.

Саопштења на међународним скуповима штампана у целини у Зборницима радова (M33):

9. *Milošević, M., Petković, D., Pavlović, D. N.: Development of mechanism for inclination of Multifunctional Hospital Bed Head Section*, 9th International Conference "Research and Development in Mechanical Industry" – RADMI 2009, Vrnjačka Banja, Serbia, Volume 2, ISBN 978-86-6075-008-4, pp. 1155-1164.
10. *Milošević M., Petković, D., Pavlović, D. N.: Development of mechanism for leg position adjusting at Multifunctional Hospital Bed*, Proceedings of the 26th International Scientific Conference "65 Years Faculty of Machine Technology", Sozopol, 2010, ISBN 978-954-438-854-6, TU Sofia, 321-326.
11. *Pavlović, D. N., Petković D., Pavlović, T. N.: Optimal selection of the compliant mechanism synthesis method*, Proceedings of the International Conference "Mechanical Engineering in XXI Century", Niš, 2010, ISBN 978-86-6055-008-0, 247-250.
12. *Issa, M., Petković, D., Pavlović D. N., Zentner L.: Embedded-sensing elements made of silicone rubber for compliant robotic joint*, Proceedings of the 56th International Scientific Colloquium TU Ilmenau, University of Technology, (CD-ROM), Ilmenau (Germany), 2011, paper id 1231
13. *Petković, D., Pavlović, D. N.: Investigation and Adaptive Neuro-Fuzzy Estimation of Mechanical/Electrical Properties of Conductive Silicone Rubber*, Proceedings of the 34th International Conference on Production Engineering, Niš, 2011, pp. 385-388.
14. *Petković, D., Pavlović, N.D., Pavlović, N. T.: Development and Design of a New Type of Passively Adaptive Compliant Gripper*, Proceedings of the XI International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements, Niš, 2012, 109-112.

Радови у часописима националног значаја (M53):

15. *Jovanović, D., Petković, D., Banić, M.: TRIZ Method Application in Development of a Solar Tracker*, Journal of Mechanical Engineering Design, Volume 12, Issue 1, December 2009, ISSN 1450-5401, pp. 41-50.

Саопштења на скуповима националног значаја штампана у целини у Зборницима радова (M63):

16. *Petković D.: Razvoj novih tehnologija za 3D integrisana strujna kola*, Zbornik radova 32. Kongresa o hidropneumatičkoj automatizaciji sa međunarodnim učešćem - HIPNEF, Vrnjačka Banja, ISBN 978-86-81505-48-9, 2009, pp. 183-188.

Анализа докторске дисертације

Докторска дисертација кандидата Далибора Петковића, дипл.маш.инж., започиње предговором, сажетком на српском и енглеском језику и садржајем дисертације изложеним на 3 странице. Иза тога следи текст дисертације, изложен на 201 страници формата А4 и подељен у 4 поглавља, а на самом крају је на 6 страница наведена цитирана литература са 106 библиографских јединица, дат је списак ознака и 18 страна прилога. Дисертација садржи 212 графичких прилога и 6 нумерисаних табела.

Актуелност истраживања у овој докторској дисертацији везана је за развој адаптивних пасивних гипких система са интегрисаним сензорима и актуаторима. Било је планирано да буду развијени механизам роботског зглоба са пасивном гипкошћу и структура роботског хватача са особинама пасивности, адаптивности и гипкости па је садржај текста дисертације изложен кроз поглавља:

1. Увод
2. Развој новог типа пасивног роботског зглоба
3. Развој новог типа роботског хватача
4. Закључак

У **уводном** поглављу су најпре објашњени основни појмови теме докторске дисертације, а затим мотиви за израду дисертације, њени циљеви и структура.

У **другом** поглављу дат је најпре преглед актуелних решења пасивних роботских зглобова и њихова анализа; пасивни зглобови имају способност мењања крутости када спољашња ударна сила прекорачи одређену границу, обезбеђујући „меке“ контакте са окружењем. Ова могућност је посебно важна код робота који често долазе у контакт са човеком или раде у ризичним условима па је потребно осигурати додатну безбедност у њиховој интеракцији са околином.

Применом ТРИЗ методе анализиране су могућности побољшања постојећих модела оваквих зглобова. Функција безбедности контакта са спољашњим објектима указала је на могућност побољшања које би се постигло интегрисањем сензора у структуру пасивног роботског зглоба. Као материјал за израду сензора одабрана је електропроводљива силиконска гума која мења електричну отпорност при деформацијама условљеним дејством напрезања на притисак, истезање и савијање. Пројектован је нови тип пасивног роботског зглоба са интегрисаним сензорима и моделирано његово понашање, а затим су његове карактеристике тестиране и на реалном моделу. Пројектовани роботски зглоб омогућава и детекцију смера спољашње ударне силе као и детекцију смера релативне ротације елемената зглоба.

Израђени су сензорски елементи различитог облика (у раду је описана и технологија израде) и експериментално проверене њихове карактеристике, како самих сензора пре интегрисања у структуру зглоба тако и након интегрисања. Поред мерења промене електричне отпорности сензора при његовој компресији и релаксацији напрезања, један од циљева био је и установити колико се пластично деформише овај материјал при различитим напрезањима. Ради бољег разумевања механизма деформисања електропроводљиве силиконске гуме, у овом поглављу је представљен нови конститутивни (математички) модел који омогућује предикцију понашања еластомерних материјала за временски зависне велике деформације. Овај модел је развијен на основу експерименталних резултата, применом адаптивне неуро-фази (АНФИС) методологије. У овом поглављу је истраживана и предикција механичких и електричних карактеристика дате силиконске гуме применом АНФИС модела који је веома робустан и може да прихвати и грешке мерења (експерименталних резултата). Резултати предикције указују на занемарљиво одступање од карактеристика реалног модела, добијених експериментално.

Други циљ ове дисертације био је развити роботски хватач који би имао могућност прилагођавања облика хватаљки различитим, унапред непознатим облицима спољашњих

површина радних објеката. Систем који има способност за адаптацију, односно има могућност да се прилагоди различитим и непознатим (новим) ситуацијама, назива се адаптивним. У **трећем** поглављу је стога дат најпре преглед актуелних решења роботских адаптивних гипких хватача и њихова анализа. Применом ТРИЗ методе анализиране су и могућности побољшања постојећих модела оваквих хватача. Функција безбедности контакта хватача са објектима хватања указала је на могућност побољшања које би се постигло коришћењем еластичних материјала за израду хватача са пасивном гипкошћу и особином подактуације што поједностављује алгоритам управљања (понекад и елиминише потребу за управљањем) и смањује број потребних активних актуатора за реализовање захтеваних карактеристика хватача (прилагођавање различитим облицима објеката).

Разматрањем принципа локалног квалитета дошло се и до закључка да структура хватача треба у појединим сегментима да има интегрисане сензоре који би истовремено представљали како сегменте хватача тако и сензоре; потребно је само одредити најпогодније локације ових сензора, које карактеришу велике деформације током процеса хватања, како би функција ових сензора дошла до изражаја. У усвојеном моделу функције је манипулисање објектима неправилног облика омогућено без аквизиције и анализе сигнала из контактних сензора, али је омогућена анализа сигнала из сензора интегрисаних у структуру хватача.

Циљ је био развити адаптивни хватач који би био довољно једноставан за израду и управљање. Изабрано је да прсте двопрстог хватача покреће гипки механизам пошто све гипке механизме, захваљујући великом броју степени слободе кретања и њиховом пасивном понашању, карактерише подактуација. Та стратегија смањења броја актуатора (подактуација) уз истовремено задржавање способности хватача да се адаптира различитим облицима објекта хватања (повећање броја контактних тачака) представља значајан допринос ове дисертације овој веома актуелној области истраживања. Пасивни гипки хватачи су посебно подесни за примене у непознатим окружењима, где се особине објекта хватања не познају унапред, а не може се поуздати у сензоре. Гипкост прстију омогућује да се хватач пасивно прилагоди широком опсегу облика објекта уз минималне контактне силе. Пасивна гипкост је од велике користи и код ударних контактних сила, где закашњење сигнала повратне спреге најчешће доводи до неадекватне контроле ових сила. Гипкост омогућава и ниже цене имплементације, захваљујући редукацији броја сензора и актуатора потребних за хватање објеката.

За добијање оптималне топологије структуре хватача који треба да задовољи претходно наведене критеријуме коришћене су две нумеричке методе: метод оптималног критеријума и итеративна оптимизациона процедура применом методе коначних елемената. За анализу добијеног решења хватача коришћене су такође нумеричке методе, пре свега метода коначних елемената, али и неке аналитичке методе, као што је теорија навоја за анализу интеракције хватача са објектима.

Као материјал за израду интегрисаних сензора одабрана је као и код роботског зглоба електропроводљива силиконска гума. Пројектован је нови тип хватача са интегрисаним сензорима и моделирано његово понашање, а затим су његове карактеристике тестиране и на реалном моделу. Цела структура хватача израђена је од силиконске гуме, већим делом непроводљиве; само су поједини сегменти ове монолитне структуре (које карактеришу велике деформације током процеса хватања) израђени од електропроводљиве силиконске гуме и они се могу користити као сензори за мерење и

детекцију различитих карактеристика што представља један од значајних доприноса ове дисертације области адаптивних пасивних гипких система са интегрисаним сензорима.

Интегрисани сензори су коришћени за детектовање објеката хватања и препознавање његовог облика. Развијен је и управљачки систем који би према препознатом облику објекта регулисао улазно померање актуатора. Према датим експерименталним резултатима креирано је управљање хватањем објеката конвексног облика, објеката конкавног облика и управљање хватачем када не долази у контакт ни са каквим објектом, али се ова АНФИС мрежа може лако надоградити новим експерименталним подацима како би се покрио знатно већи опсег облика објеката хватања.

На самом крају трећег поглавља је АНФИС методологија примењена и за одређивање вредности контактних сила хватача на основу дате кинетостатичке анализе. Добијен је систем који може да процењује величине контактних сила хватача у зависности од положаја контактне тачке на хватачу.

У завршном поглављу дата су закључна разматрања сваког од сегмената докторске дисертације и наведени могући даљи правци истраживања у овој области.

ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу изложене анализе докторске дисертације чланови Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације закључују да:

- садржај докторске дисертације у потпуности одговара теми прихваћеној од стране Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Нишу,
- кандидат поседује интердисциплинарна знања каква је захтевала израда оваквог рада,
- кандидат успешно користи и повезује савремене софтверске алате,
- кандидат је испољио високи ниво креативности и оригиналности и способност да изврши синтезу знања из различитих научних области у циљу реализације постављеног задатка,
- на бази теоријских и нумеричких истраживања пројектовани су нови, побољшани типови пасивног роботског зглоба и адаптивног хватача са интегрисаним сензорима, моделирано је њихово понашање и експериментално верификоване њихове карактеристике на реалном моделу,
- кандидат је дошао до оригиналних резултата који представљају значајан допринос науци у области адаптивних пасивних гипких система са интегрисаним сензорима, и који су публиковани или су прихваћени за штампу у високо ранжираним часописима из уже научне области којој припада тема докторске дисертације,
- добијени резултати пружају могућност за даља теоријска и експериментална истраживања у овој области,
- рад је адекватно конципиран, технички квалитетно урађен и омогућава прегледно праћење изложеног садржаја и добијених резултата истраживања.

На основу свега претходно изложеног чланови Комисије констатују да поднета докторска дисертација представља оригиналан и вредан допринос области адаптивних пасивних гибких система са интегрисаним сензорима и предлажу са задовољством Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Нишу да рад кандидата Далибора Петковића, дипл.маш.инж., под називом:

**Истраживање и развој адаптивних пасивних гибких система
са интегрисаним сензорима и актуаторима**

прихвати као докторску дисертацију и кандидата позове на усмену јавну одбрану.

У Нишу, Београду, Илменау
новембра 2012.

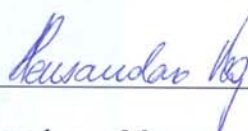
Чланови Комисије



др Ненад Д. Павловић,
редовни професор Машинског факултета у Нишу
ужа научна област: Мехатроника



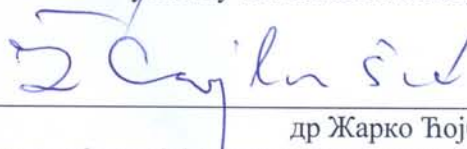
Prof. Dr.-Ing. habil. Lena Zentner,
Ilmenau University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering
ужа научна област: Теорија машина и механизма



др Александар Вег,
редовни професор Машинског факултета у Београду
ужа научна област: Теорија машина и механизма



др Ненад Т. Павловић,
ванредни професор Машинског факултета у Нишу
ужа научна област: Мехатроника



др Жарко Ђојбашић,
ванредни професор Машинског факултета у Нишу
ужа научна област: Аутоматско управљање и роботика