

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата **мр Иване Јокић**, дипл. инж. ел., за израду докторске дисертације

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду бр. 931/1 од 21.01.2014. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата **мр Иване Јокић**, дипл. инж. ел., за израду докторске дисертације и научне заснованости теме **"Адсорпционо-десорпциони шум и временски одзив МЕМС хемијских и биолошких сензора"**.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Ивана Јокић је рођена 30.7.1972. у Београду, где је завршила основну школу, а затим и Математичку гимназију. Електротехнички факултет Универзитета у Београду завршила је 2000. године на Одсеку за електронику, телекомуникације и аутоматику – смер Телекомуникације, са просечном оценом свих положених испита 9,23. Дипломски рад одбранила је 2000. године. Ивана Јокић је 2013. године завршила последипломске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на смеру Телекомуникације, са просечном оценом 10,00 свих положених испита. Магистарски рад чији је наслов "Примена МЕМС компоненти у бежичним телекомуникационим системима и утицај адсорпционо-десорпционих процеса на перформансе резонантних РФ МЕМС компоненти" одбранила је 2013. године.

Од априла 2001. године ради у Институту за хемију, технологију и металургију - Центар за микроелектронске технологије, Универзитета у Београду, прво као истраживач приправник, а 2013. године је изабрана у звање истраживача сарадника. Научноистраживачка делатност Иване Јокић припада области микроелектромеханичких система (МЕМС) и наноелектромеханичких система (НЕМС), намењених за реализацију нове генерације сензора и сензорских мрежа са бежичном комуникацијом, као и високофреквенцијских резонатора за примену у бежичним телекомуникационим системима. Учествовала је у реализацији већег броја истраживачких пројеката које је финансирало Министарство Републике Србије надлежно за област науке и технолошког развоја у периоду 2001-2014. године, као и међународних пројеката финансираних од стране Европске Уније и Швајцарске националне фондације за науку. Ивана Јокић је тренутно ангажована на националном пројекту: "Микро, нано-системи и сензори за примену у електропривреди, процесној индустрији и заштити животне средине" (TR32008, 2011-2014. године), у оквиру којег руководи реализацијом потпројекта "Истраживање и развој хемијских и биолошких сензора са микро/нано-гредицама, истраживање адсорпционо-десорпционих процеса и флукуационих појава код МЕМС/НЕМС структура".

Провела је два месеца (2011. године) на стручном усавршавању на факултету ЕПФЛ у Лозани (Швајцарска), где је учествовала у истраживањима из области микросистемских технологија за реализацију електронских компоненти и електричних кола на флексибилним супстратима ("*Flexible radio*") и похађала основни курс за рад у чистој соби ("*Introductory cleanroom training course*") у једном од водећих центара за израду и карактеризацију микро- и наноструктура при универзитетима у Европи. Ивана Јокић је завршила обуку за рад на АФМ (*Atomic Force Microscope*) уређају нове генерације за карактеризацију електричних, магнетских, механичких и морфолошких параметара микро- и наноструктура, као и обуку за рад на уређају за ласерску фотолитграфију, који се користи у Центру за микроелектронске технологије у процесу израде МЕМС сензора и других компоненти.

Добитник је награде за најбољи рад младих аутора на 47. Конференцији за ЕТРАН (Секција за микроелектронику и оптоелектронику). Рецензент је часописа *Sensors and Actuators A: Physical* (из категорије врхунских међународних часописа).

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Кандидат Ивана Јокић је свој магистарски рад, чији је наслов "Примена МЕМС компоненти у бежичним телекомуникационим системима и утицај адсорпционо-десорпционих процеса на перформансе резонантних РФ МЕМС компоненти", радила под руководством ментора проф. др М.Л. Дукића и одбранила га 4. септембра 2013. године на Електротехничком факултету у Београду. Тема магистарског рада припада областима микроелектромеханичких система, телекомуникација и теорије случајних процеса.

Један од битних научно-стручних доприноса овог магистарског рада је врло детаљан преглед досадашњих резултата и актуелног стања развоја МЕМС технологија и компоненти за примену у савременим бежичним примопредајницима, који поред класификације радиофреквенцијских (РФ) МЕМС компоненти, описа принципа рада, наведених предности и недостатака у односу на компоненте израђене конвенционалним технологијама, садржи критички осврт на до сада остварене перформансе и сугестије за даља побољшања. Дате су смернице за будућа истраживања, које се односе, пре свега, на оптимизацију параметара РФ МЕМС компоненти према захтевима садашњих и будућих мобилних система. Поред тога, прегледом РФ МЕМС технологије, која је у свету изузетно актуелна, а у Србији је ретко била истраживана, створена је основа и дат подстицај за развој ове нове и перспективне истраживачке области у домаћој науци.

Пошто је генерални тренд смањивања димензија МЕМС структура праћен порастом шума компоненти, што може бити ограничење за перформансе система, а тиме и за примену РФ МЕМС и НЕМС компоненти у бежичним телекомуникационим системима, у другом делу магистарског рада је приказана анализа шума резонантних МЕМС и НЕМС компоненти које су посебно значајне за реализацију потпуно интегрисаних бежичних примопредајника будућих мобилних терминала који подржавају рад у великом броју фреквенцијских опсега и према великом броју комуникационих стандарда. Након разматрања механизма генерисања шума карактеристичних за МЕМС и НЕМС, приказано је теоријско моделирање шума који је последица неизбежних стохастичких адсорпционо-десорпционих (АД) процеса. Значајан научно-стручни допринос магистарског рада остварен је тиме што су развијени теоријски модели АД фазног шума МЕМС и НЕМС резонатора. На основу спроведене квантитативне анализе закључено је да ниво АД фазног шума расте са порастом резонантне учестаности (а тиме и са смањењем димензија) резонатора. Примећено је да овај шум има малу вредност при притисцима блиским атмосферском, али да постаје значајан на нижим притисцима, чије вредности одговарају типичним радним притисцима у атмосфери која окружује резонатор. Анализа је показала да састав смеше гасова у окружењу резонатора утиче на ниво фазног шума. Развијени теоријски модели имају практични значај, јер омогућују процену доприноса

фазног АД шума укупном шуму РФ MEMC и NEMC резонатора, процену његовог утицаја на перформансе на нивоу целог система, затим оптимизацију дизајна компоненти и радних услова у циљу минимизације шума, као и развој нових метода за минимизацију шума.

Предложена тема докторске дисертације надовезује се на истраживања приказана у магистарском раду кандидата, јер обухвата развој унапређених теоријских модела адсорпционо-десорпционог шума MEMC и NEMC структура намењених за реализацију сензора и сензорских мрежа са бежичном комуникацијом.

Научноистраживачка делатност Иване Јокић у вези са темом предложене докторске дисертације обухвата развој нове генерације MEMC и NEMC сензора намењених реализацији бежичних сензорских мрежа за мерење параметара животне средине. У области теорије адсорпционо-десорпционих процеса и шума Ивана Јокић је дала већи број оригиналних доприноса, који су применљиви код свих типова хемијских и биолошких сензора чији се принцип рада заснива на адсорпцији циљне супстанце, а такође и код других MEMC направа (на пример, високофреквенцијских резонатора и осцилатора за примену у бежичним телекомуникационим системима). Ивана Јокић је аутор или коаутор 9 радова у врхунским међународним часописима, једног рада у истакнутом научном часопису, једног рада у међународном часопису, 2 рада у научним часописима, једног рада у националном часопису, 33 рада на међународним конференцијама, 9 радова на националним конференцијама, једне студије изводљивости и 13 техничких решења. Учесник је већег броја међународних и националних научних конференција из области MEMC-а, нанотехнологија, телекомуникација и микроелектронике.

A. Списак публикованих радова и техничких решења

A.1 Радови у међународним часописима са импакт фактором

Радови у врхунским међународним часописима (M21)

1. M. Frantlović, **I. Jokić**, Z. Djurić, K. Radulović, "Analysis of the Influence of Competitive Adsorption and Mass Transfer on Adsorbed Mass Fluctuations in Affinity-Based Biosensors", *Sensors and Actuators B*, Vol. 189, 2013, pp. 71-79 (IF=3.535 in 2012).
2. **I. Jokić**, Z. Djurić, M. Frantlović, K. Radulović, P. Krstajić, Z. Jokić, "Fluctuations of the number of adsorbed molecules in biosensors due to stochastic adsorption-desorption processes coupled with mass transfer", *Sensors and Actuators B*, Vol. 166-167, 2012, pp. 535-543 (IF=3.898 in 2011).
3. **I. Jokić**, Z. Djurić, M. Frantlović, K. Radulović, P. Krstajić, "Fluctuations of the mass adsorbed on microcantilever sensor surface in liquid-phase chemical and biochemical detection", *Microelectronic Engineering*, Vol. 97, 2012, pp. 396-399 (IF=1.557 in 2011).
4. M. Frantlović, **I. Jokić**, V. Savu, S. Xie, J. Brugger, "Effects of tensile stress on electrical parameters of thin film conductive wires fabricated on a flexible substrate using stencil lithography", *Microelectronic Engineering*, Vol. 98, 2012, pp. 230-233 (IF=1.557 in 2011).
5. Z. Djurić, **I. Jokić**, M. Djukić, M. Frantlović, "Fluctuations of the adsorbed mass and the resonant frequency of vibrating MEMS/NEMS structures due to multilayer adsorption", *Microelectronic Engineering*, Vol. 87, 2010, pp. 1181-1184.
6. Zoran G. Djurić, **Ivana M. Jokić**, Miloš P. Frantlović, Katarina T. Radulović, "Two-layer adsorption and adsorbed mass fluctuations on micro/nanostructures", *Microelectronic Engineering*, Vol. 86, 2009, pp. 1278-1281.
7. Z. G. Djurić, **I. M. Jokić**, M. P. Frantlović, "Analysis of transient adsorption processes using micro/nanocantilever oscillators", *Microelectronic Engineering*, Vol. 85, 2008, pp. 1386-1389.

8. Z. Djurić, **I. Jokić**, M. Frantlović, O. Jakšić, "Fluctuations of the number of particles and mass adsorbed on the sensor surface surrounded by a mixture of an arbitrary number of gases", *Sensors and Actuators B*, Vol. 127, 2007, pp. 625-631.
9. Z. Djurić, **I. Jokić**, "Thermomechanical noise of nanooscillators with time-dependent mass", *Microelectronic Engineering*, Vol. 84, 2007, pp. 1639-1642.

Радови у истакнутим међународним часописима (M22)

1. Z. Djurić, D. Randjelović, **I. Jokić**, J. Matović, J. Lamovec, "A new approach to IR bimaterial detectors theory", *Infrared Physics & Technology*, Vol. 50, 2007, pp. 51-57.

Радови у међународним часописима (M23)

1. D. Nešić, **I. Jokić**, M. Frantlović, M. Sarajlić, "Wide band-stop microwave microstrip filter on high-resistivity silicon", *Informacije MIDEM, Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials*, Vol. 42, 2012, pp. 282-286.

A.2 Радови публиковани у целини на конференцијама од међународног значаја (M33)

1. **I. Jokić**, Z. Djurić, K. Radulović, M. Frantlović, "Fluctuations of the number of adsorbed micro/nanoparticles in sensors for measurement of particle concentration in air and liquid environments", *Proceedings of the 4th International Workshop and Conference on Particulate Matter: Research and Management, WeBIOPATR2013, Belgrade 2013*, pp. 147-150.
2. **I. Jokić**, K. Radulović, M. Frantlović, Z. Djurić, D. Vasiljević-Radović, "Combined influence of competitive binding and mass transfer on response of affinity-based biosensors", *Proceedings of the Regional Biophysics Conference, Kladovo-Belgrade 2012*, pp. 45-47.
3. K. Radulović, **I. Jokić**, M. Frantlović, Z. Djurić, "Adsorption-Desorption Noise in Nanowire FET Biosensors", *Proceedings of the 28th International Conference on Microelectronics MIEL 2012, Niš 2012*, pp. 203-207.
4. Z. Djurić, K. Radulović, **I. Jokić**, M. Frantlović, "Characterization of Adsorption-Desorption Processes on Semiconductor Surfaces Using Nanocantilever Mass Sensors", *Proceedings of the 28th International Conference on Microelectronics MIEL 2012, Niš 2012*, pp. 161-164.
5. D. Nešić, **I. Jokić**, M. Frantlović, "Simulation of a Wide Band-stop Filter on High-resistivity Silicon (HRS) Substrate", *Proceedings of the 28th International Conference on Microelectronics MIEL 2012, Niš 2012*, pp. 281-283.
6. D. Nešić, **I. Jokić**, M. Frantlović, "Microwave microstrip wide band-stop filter on high resistivity silicon (HRS) supstrate", *Proceedings of the 5th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH 2012, Belgrade 2012*, pp. 498-500.
7. **I. Jokić**, K. Radulović, D. Vasiljević-Radović, "Detection of target substances using affinity-based MEMS/NEMS sensors: A problem of selectivity", *Proceedings of the 5th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH 2012, Belgrade 2012*, pp. 398-401.
8. O. Jakšić, Z. Jakšić, D. Randjelović, **I. Jokić**, M. Frantlović, "Adsorption-desorption processes in defense against chemical, biological, radiological, nuclear and explosive threats", *Proceedings of the 5th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH 2012, Belgrade 2012*, pp. 701-706.
9. O. Jakšić, Z. Jakšić, **I. Jokić**, D. Randjelović, Lj. Kolar-Anić, "Multicomponent monolayer gas adsorption: the effect of molecular size and the number of binding sites on sorption rates", *Proceedings of the 11th Internat. Conf. on Fundamental and Applied Aspects of Physical Chemistry, Belgrade 2012, Vol. 2*, pp. 669-671.

10. **I. Jokić**, M. Frantlović, Z. Djurić, M. Dukić, "Adsorption-Desorption Phase Noise in RF MEMS/NEMS Resonators", Proceedings of the 10th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services TELSIKS 2011, Niš 2011, pp. 114-117.
11. **I. Jokić**, Z. Djurić, K. Radulović, M. Frantlović, P. Krstajić, "Analysis of response and adsorption-desorption fluctuations spectrum of MEMS/NEMS chemical and biological sensors", Proceedings of the 4th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH 2011, Belgrade 2011, pp. 447-451.
12. Z. Djurić, **I. Jokić**, M. Frantlović, D. Randelović, D. Vasiljević-Radović, M.M. Smiljanić, and Ž.Lazić, "Fabrication and Characterization of AFM Golden Microcantilevers and Measurement of Small Electromagnetic Forces", Proceedings of the 26th Internat. Conf. on Microelectronics MIEL, Niš 2008, Vol. 2, pp. 363-366.
13. Zoran G. Djurić, **Ivana M. Jokić**, and Miloš P. Frantlović, "Optimization of Micro/Nanooscillator Parameters for Analysis of Transient Adsorption Processes", Proceedings of the 26th Internat. Conf. on Microelectronics MIEL, Niš 2008, Vol. 2, pp. 359-362.
14. M. Frantlović, **I. Jokić**, D. Nešić, "A wireless system for liquid level measurement", Proceedings of the 8th International Conference on Telecommunication in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services TELSIKS 2007, Niš 2007, pp. 475-478.
15. Z. Jakšić, Z. Djurić, O. Jakšić, **I. Jokić**, M. Frantlović, "Refractive index fluctuations in nanoplasmonic sensors induced by adsorption-desorption phenomena", Proceedings of the International Conference for Micro and Nanotechnology Viennano'07, Vienna (Austria) 2007, pp. 363-370.
16. Z. Jakšić, Z. Đurić, O. Jakšić, **I. Jokić**, M. Frantlović, "Adsorption-desorption noise in surface plasmon resonance sensors", Proceedings of the 8th Internat. Conf. on Fundamental and Applied Aspects of Physical Chemistry, Belgrade 2006, Vol. II, pp. 671-673.
17. Z. Djurić, O. Jakšić, **I. Jokić**, M. Frantlović, "Adsorbed Mass Fluctuations of a Micro/Nanoresonator Surrounded by an Arbitrary Gas Mixture", Proceedings of the 25th Internat. Conf. on Microelectronics MIEL, Belgrade 2006, Vol. 1, pp. 103-106.
18. Z. Djurić, **I. Jokić**, O. Jakšić, M. Frantlović, "Adsorption-desorption processes in nanosystems", Proceedings of the 1st Internat. Workshop on Nanoscience & Nanotechnology IWON, Belgrade 2005, pp. 33-36.
19. Z. Djurić, **I. Jokić**, M. Frantlović, O. Jakšić, D. Vasiljević-Radović, "Adsorbed Mass and Resonant Frequency Fluctuations of a Microcantilever Caused by Adsorption and Desorption of Particles of Two Gases", Proceedings of the 24th International Conference on Microelectronics MIEL, Niš 2004, Vol. 1, pp. 197-199.
20. Z. Djurić, **I. Jokić**, M. Frantlović, O. Jakšić, "Influence of Adsorption-Desorption Process on Resonant Frequency and Noise of Micro- and Nanocantilevers", Proceedings of the 23rd International Conference on Microelectronics MIEL, Niš 2002, Vol. 2, pp. 243-246.

A.3 Радови публиковани у изводу на конференцијама од међународног значаја (M34)

1. Z. Jakšić, O. Jakšić, **I. Jokić**, S. Vuković, D. Vasiljević-Radović, "Effective medium approach to response of adsorption-based nanoplasmonic chemical sensors", Proc. Abstr. 6th Mediterranean Conference on Nanophotonics MediNano-6, 30-31 October, 2013, Lyon, France.

2. Z. Jakšić, O. Jakšić, **I. Jokić**, "Adsorption-induced fluctuations and noise in plasmonic metamaterial devices", Proc. Abstr. IV International School and Conference on Photonics PHOTONICA'13 (M34), 2013, Institute of Physics - University of Belgrade, p. 145.
3. Z. Djurić, **I. Jokić**, A. Peleš, "Fluctuations of the number of adsorbed molecules due to adsorption-desorption processes coupled with mass transfer and surface diffusion in bio/chemical MEMS sensors", Proc. Abstr. 39th International Conference on Micro and Nano Engineering MNE 2013, London (UK) 2013, P-LIFE-33.
4. **Ivana Jokić**, Katarina Radulović, Miloš Frantlović, Dušan Nešić, Branko Vukelić, Dana Vasiljević-Radović, "Nonspecific reversible adsorption processes and their fluctuations in MEMS biosensors based on piezoelectric ceramic materials", Proc. Abstr. 2nd Conference of The Serbian Ceramic Society, Belgrade 2013.
5. Z. Djurić, **I. Jokić**, M. Frantlović, K. Radulović, "Intrinsic noise equivalent concentration of dynamic mode microcantilever biosensors", Proc. Abstr. 38th International Conference on Micro and Nano Engineering MNE 2012, Toulouse (France) 2012, P378-422.
6. **I. Jokić**, Z. Djurić, M. Frantlović, K. Radulović, P. Krstajić, "Fluctuations of the Mass Adsorbed on Microcantilever Sensor Surface in Liquid-Phase Chemical and Biochemical Detection", Proc. Abstr. 37th International Conference on Micro and Nano Engineering MNE 2011, Berlin (Germany) 2011, P-LIFE-041.
7. M. Frantlović, **I. Jokić**, V. Savu, S. Xie, J. Brugger, "Effects of tensile stress on electrical parameters of thin film conductive wires fabricated on a flexible substrate using stencil lithography", Proc. Abstr. 37th International Conference on Micro and Nano Engineering MNE 2011, Berlin (Germany) 2011, P-LITH-111.
8. **I. Jokić**, M. Frantlović, M. Djukić, Z. Djurić, "A method for determination of desorption energy using an oscillating microcantilever", Proc. Abstr. 36th International Conference on Micro and Nano Engineering MNE 2010, Genoa (Italy) 2010, P-MEMS-02.
9. Z. Djurić, **I. Jokić**, M. Djukić, M. Frantlović, "Fluctuations of the mass and resonant frequency of vibrating MEMS/NEMS structures due to multilayer adsorption", Proc. Abstr. 35th International Conference on Micro and Nano Engineering MNE 2009, Ghent (Belgium) 2009, P-MEMS-27.
10. Zoran G. Djurić, **Ivana M. Jokić**, Miloš P. Frantlović, Katarina T. Radulović, "Two-layer adsorption and adsorbed mass fluctuations on micro/nanostructures", Proc. Abstr. 34th International Conference on Micro- and Nano-Engineering MNE 2008, Athens (Greece) 2008.
11. Z. Djurić, **I. Jokić**, M. Frantlović, "Analysis of transient adsorption processes using micro/nanocantilever oscillators", Proc. Abstr. 33rd International Conference on Micro- and Nano-Engineering MNE 2007, Copenhagen (Denmark) 2007.
12. Z. Djurić, **I. Jokić**, "Thermomechanical noise of nanooscillators with time-dependent mass", Proc. Abstr. 32nd International Conference on Micro- and Nano-Engineering MNE 2006, Barcelona (Spain) 2006.
13. Z. Djurić, **I. Jokić**, D. Vasiljević-Radović, O. Jakšić, D. Randjelović, J. Lamovec, "Micro/nano-electromechanical sensors for environmental protection", Proc. Abstr. The Sixth European Meeting on Environmental Chemistry – EMEC 6, Belgrade 2005.

A.4 Радови публиковани у националним часописима (M52)

1. **И. Јокић**, З. Ђурић, М. Франтловић, О. Јакшић, Д. Васиљевић-Радовић, "Одређивање десорпционе енергије која карактерише адсорпционо-десорпциони процес код MEMS и NEMS сензора", *ETF Journal of Electrical Engineering*, Vol. 12, 2004, pp. 50-55.

A.5 Радови публиковани у научним часописима (M53)

1. М. Frantlović, **I. Jokić**, Z. Djurić, K. Radulović, "Analysis of the Influence of Competitive Adsorption and Mass Transfer on Adsorbed Mass Fluctuations in Affinity-Based Biosensors", *Procedia Engineering*, Vol. 47, 2012, pp. 957–960.
2. Z. Djurić, D. Randjelović, P. Krstajić, **I. Jokić**, M. Djukić, "Theory of Infrared Detector Based on the Microcantilever Resonant Frequency Temperature Dependence", *Procedia Engineering*, Vol. 25, 2011, pp. 383-386.

A.6 Радови публиковани у целини на конференцијама од националног значаја (M63)

1. **Ivana Jokić**, Katarina Radulović, Miloš Frantlović, Marko Obradov, "Kompetitivna reverzibilna adsorpcija spregnuta sa prenosom mase kod mikro/nanobiosenzora sa protočnom reakcionom komorom", *Proc. 57th ETRAN Conference*, Zlatibor 2013.
2. М. Сарајлић, **И. Јокић**, З. Ђурић, "Детектовање присуства гасне живе помоћу мерења шума на микроелектронском сензору", *Proc. 56th ETRAN Conference*, Zlatibor 2012, pp. MO2.4-1-3, ISBN 978-86-80509-67-9.
3. З. Ђурић, П. М. Крстајић, К. Радуловић, **И. Јокић**, "Анализа флукуација броја адсорбованих честица гаса на површини полупроводничког сензора", *Proc. 56th ETRAN Conference*, Zlatibor 2012, pp. MO2.4-1-3, ISBN 978-86-80509-67-9.
4. **I. Jokić**, Z. Đurić, D. Randelović, M. Đukić, M. Frantlović, D. Vasiljević-Radović, J. Buha, D. Tanasković, "Metoda za preciznu karakterizaciju mikro/nanogredica hemijskih i bioloških senzora za merenja u gasovima i tečnostima", *Zbornik radova 54. Konferencije ETRAN*, Gornji Milanovac 2010, pp. MO 3.8-1-4, ISBN 978-86-80509-65-5.
5. Z. Djurić, **I. Jokić**, Ž. Lazić, M. M. Smiljanić, D. Randelović, D. Vasiljević-Radović, K. Radulović, "Mikrogredice od zlata za merenje malih koncentracija žive u gasovitoj sredini", *Proc. 53rd Conference for Electronics, Telecommunications, Computers, Automation and Nuclear Engineering ETRAN*, Vrnjačka Banja 2009, pp. MO4.1-1-4, ISBN 978-86-80509-64-8.
6. З. Ђурић, **И. Јокић**, О. Јакшић, "Одређивање параметара адсорпционих процеса помоћу временског одзива осцилатора са микрогредицом", *Зборник радова 49. Конференције за ЕТРАН*, Будва 2005, том IV.
7. **И. Јокић**, З. Ђурић, М. Франтловић, О. Јакшић, Д. Васиљевић-Радовић, "Одређивање десорпционе енергије која карактерише адсорпционо-десорпциони процес код MEMS и NEMS сензора", *Зборник радова 47. Конференције за ЕТРАН*, Херцег Нови 2003, том IV, стр. 274-276.
8. З. Ђурић, **И. Јокић**, М. Франтловић, О. Јакшић, "Фазни шум код микро- и наномеханичких резонатора", *Зборник радова 10. Телекомуникационог форума ТЕЛФОР*, Београд 2002, стр. 647-649.
9. З. Ђурић, **И. Јокић**, М. Франтловић, О. Јакшић, "Осетљивост и адсорпционо-десорпциони шум сензора са наномеханичким резонантним структурама", *Зборник радова 46. Конференције за ЕТРАН*, Бања Врућица, Теслић 2002, том IV, стр. 195-198.

A.7 Магистарски рад (M72)

1. **Ивана Јокић**, "Примена МЕМС компоненти у бежичним телекомуникационим системима и утицај адсорпционо-десорпционих процеса на перформансе резонантних РФ МЕМС компоненти", Електротехнички факултет Универзитета у Београду, септембар 2013, ментор проф. др М.Л. Дукић.

A.8 Призната техничка решења из области предложене докторске дисертације

Битно побољшано лабораторијско постројење (M84)

1. Весна Јовић, Милија Сарајлић, Јелена Ламовец, Катарина Радуловић, **Ивана Јокић**, Драган Танасковић, Милош Воркапић, Богдан Поповић, **Битно побољшано лабораторијско постројење**: "Апаратура која обезбеђује контролисан парцијални притисак Нg у атмосфери носећег гаса при испитивању сензора елементарне Нg", TR 11027 MNTRS, 2010, ИНТМ-СМТМ, одговорно лице: Весна Јовић.

Нова метода, лабораторијски прототип, прототип (M85)

1. **Ивана Јокић**, Милош Франтловић, Зоран Ђурић, Олга Јакшић, Дана Васиљевић-Радовић, **Нова метода**: Одређивање десорпционе енергије гаса коришћењем микрогредице у динамичком режиму рада, Руководилац пројекта: др Дана Васиљевић-Радовић, Одговорно лице: Ивана Јокић, Пројекат: ТР 32008, Година: 2011.
2. Б. Вукелић, М. Франтловић, **И. Јокић**, Д. Васиљевић-Радовић, **Лабораторијски прототип**: "Лабораторијски прототип интелигентног мерача притиска са Ethernet комуникацијом", Руководилац пројекта: др Дана Васиљевић-Радовић, Одговорно лице: Милош Франтловић, Пројекат: ТР 32008, Реализатори: ИХТМ-ЦМТМ, Корисници: ИХТМ-ЦМТМ, ЕПС, Година: 2011.
3. **Ивана Јокић**, Зоран Ђурић, Маја Ђукић, Милош Франтловић, Данијела Ранђеловић, Дана Васиљевић-Радовић, Јелена Буха, **Нова метода**: "Експериментална карактеризација микро/наногредице коришћењем АФМ-а са вакуумским системом", TR 11027 MNTRS, 2009, ИНТМ-СМТМ, одговорно лице: Зоран Ђурић.
4. Z. Đurić, **I. Jokić**, M. M. Smiljanić, Ž. Lazić, D. Randelović, D. Vasiljević-Radović, K. Radulović, M. Frantlović, **Лабораторијски прототип**: "Mikrogređice od zlata za detekciju i merenje malih koncentracija žive u gasovitoj sredini", TR 11027 MNTRS, 2008, ИНТМ-СМТМ.
5. З. Ђурић, Ж. Лазић, М. М. Смиљанић, **И. Јокић**, Д. Васиљевић-Радовић, Д. Ранђеловић, К. Радуловић, **Прототип**: "Златне АФМ-гредице U и V облика за мерење магнетске силе, магнетског поља и интензитета струје у проводницима", ТР6151 МНЗЖС, 2007, ИХТМ-ЦМТМ, одговорно лице: Ж. Лазић.
6. З. Ђурић, **И. Јокић**, Д. Васиљевић-Радовић, Д. Ранђеловић, М. М. Смиљанић, М. Франтловић, **Нова метода**: "Метода за мерење малих електромагнетских сила помоћу АФМ-а у статичком и динамичком режиму рада", ТР6151 МНЗЖС, 2007, корисник: ИХТМ-ЦМТМ – Истраживање сензора нове генерације, одговорно лице: И. Јокић.
7. З. Ђурић, **И. Јокић**, Д. Васиљевић-Радовић, Д. Ранђеловић, М. М. Смиљанић, **Нова метода**: "Метода карактеризације константе крутости проводне микрогредице мерењем угиба гредице под дејством магнетске силе у пољу сталног магнета", ТР6151 МНЗЖС, 2007, корисник: ИХТМ-ЦМТМ – Истраживање сензора нове генерације, одговорно лице: И. Јокић.
8. М. Франтловић, З. Ђурић, Д. Васиљевић-Радовић, **И. Јокић**, Д. Нешић, А. Нешић, К. Радуловић, Д. Ранђеловић, З. Јакшић, **Лабораторијски прототип**: "Мерач нивоа

течности са радио-комуникацијом", ИП-8245, 2006, корисник: ИХТМ, руководилац: Д. Васиљевић-Радовић.

9. Д. Васиљевић-Радовић, **И. Јокић**, Д. Ранђеловић, З. Ђурић, **Нова метода**: "Одређивање динамичких карактеристика SiO_2 микрогредице помоћу микроскопа са скенирајућом сондом (SPM)", ТР6151 МНЗЖС, 2006, корисник: ИХТМ-ЦМТМ, примењује ИХТМ-ЦМТМ, руководилац: Д. Васиљевић-Радовић.
10. О. Јакшић, М. Франтловић, **И. Јокић**, **Нова метода**: "Метода за мерење и анализу шума пиезоотпорника", ТР6101 МНЗЖС, 2005, реализатор и корисник: ИХТМ-ЦМТМ, одговорно лице: О. Јакшић.

А.9 Остале публикације

1. Ж. Лазих, **И. Јокић**, Д. Васиљевић-Радовић, "Сензори са микрогредицама", Студија изводљивости, ИХТМ – Центар за микроелектронске технологије и монокристале, 2006.

Б. Истраживачки пројекти у чијој реализацији је кандидат учествовао

Б.1 Пројекти финансирани од стране Министарства Републике Србије, надлежног за област науке и технолошког развоја

1. "Микросистемске и наносистемске технологије за сензоре и оптоелектронику" (ИТ.1.04.0062.Б, 2002–2004. године)
2. "Микро и наносистемске технологије, структуре и сензори" (ТР-6151Б, 2005–2007. год.)
3. "Индустријски мерачи процесних величина са радиокомуникацијом" (ИП-82485, 2006. године)
4. "Микросистемске, наносистемске технологије и компоненте" (ТР-11027, 2008–2010. године)
5. "Микро, нано-системи и сензори за примену у електропривреди, процесној индустрији и заштити животне средине" (ТР32008, 2011-2014. године)

Б.1 Међународни пројекти

1. "*Micro-nanocantilever based detection of small electromagnetic forces*" (IB7320–110923, 2005–2008. године), SCOPEС пројекат, финансиран од стране Швајцарске националне фондације за науку (*Swiss National Science Foundation*)
2. "*Reinforcement of Regional Microsystems and Nanosystem Centre - REGMINA*" (2008–2011. године), FP-7 пројекат Европске уније.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Научно-истраживачки рад кандидата мр Иване Јокић посвећен је области микро- и наноелектромеханичких система, намењених реализацији сензора и других направа. Овом облашћу кандидат се бави током дужег временског периода, теоријски и експериментално. На основу резултата кандидата, који су представљени публикованим научним радовима и техничким решењима, као и садржаја магистарског рада, може се закључити да је кандидат Ивана Јокић у потпуности испунила услове који је квалификују да приступи изради докторске дисертације са предложеном темом.

2. Предмет и циљ истраживања

Технологије микроелектромеханичких система омогућују израду великог броја различитих сензора и других компоненти и направа од интереса за многе техничке и научне области. Већ више од једне деценије у свету се врше интензивна истраживања у области

МЕМС хемијских и биолошких сензора за детекцију присуства и мерење концентрације молекула, атома или јона неке супстанце, биомолекула или микроорганизама у гасовитој или течной средини. Принцип рада велике групе ових сензора заснован је на реверзибилној адсорпцији циљних честица на активну површину сензорског елемента, што доводи до промене неког од његових механичких, електричних или оптичких параметара. Та промена се претвара у електрични сигнал сензора. Флукуације броја адсорбованих честица проузрокују флукуације мерног параметра и излазног сигнала сензора. Због велике осетљивости, малих димензија, мале потрошње енергије, ниске цене и могућности мерења *in situ* у реалном времену, развој МЕМС био/хемијских сензора је од великог значаја за заштиту животне средине, медицину, пољопривреду, одбрану и друге области. Они су веома погодни за реализацију сензорских мрежа и преносивих сензора са бежичном комуникацијом, код којих сензорски елемент, електронски склопови за обраду сигнала и склопови бежичног примопредајника могу бити интегрисани у запремини мањој од 1 cm³.

Да би се искористио велики потенцијал МЕМС хемијских и биолошких сензора за практичне примене, неопходна су истраживања у циљу оптимизације њихових перформанси. Од посебног интереса је анализа физичких процеса и феномена, као што су процеси адсорпције и десорпције, који су битни за функционисање сензора, али су и извор фундаменталног шума који утиче на вредност минималног детектабилног сигнала. И поред тога, тематика адсорпционо-десорпционих (АД) процеса и шума код МЕМС сензора, а посебно теоријска и експериментална анализа стохастичких флукуација одзива, у постојећој литератури је мало заступљена. Систематична и свеобухватна истраживања флукуација одзива сензора заснованих на АД процесима нису спроведена, па у литератури нема теоријских модела који узимају у обзир све релевантне чиниоце, а неопходни су у процесу оптимизације дизајна сензора и експерименталних метода. Истраживање и развој нових мерних метода које омогућују истовремено добијање већег броја информација, повећање осетљивости и брзине одзива и побољшање селективности сензора, такође су од великог практичног значаја, а у њиховој основи су теоријски модели временског одзива и АД шума.

Истраживања која се предлажу у оквиру ове дисертације надовезују се на магистарски рад Иване Јокић и на друге резултате наведене у њеној библиографији. Она имају за циљ давање научне основе за развој нове генерације високоосетљивих и селективних МЕМС хемијских и биолошких сензора за примену у бежичним сензорским мрежама. Истраживања која ће се спровести обухватају развој и примену математичко-физичких модела за анализу адсорпционо-десорпционог (АД) шума МЕМС хемијских и биолошких сензора, који је проузрокован стохастичком природом флукуација броја адсорбованих честица, као и модела за анализу временског одзива ових направа. Поред АД процеса, биће узети у обзир и други физички процеси и феномени спрегнути са АД процесом, који утичу на одзив и флукуације излазног сигнала сензора, што је ново у односу на садашње стање науке у тој области. Анализа ће омогућити да се утврде зависности временског одзива и АД шума сензора од параметара сензорског елемента, експерименталних услова и параметара процеса од значаја. Познавање ових зависности је неопходно за развој сензора унапређених перформанси, јер омогућује оптимизацију дизајна сензора и услова рада у смислу минимизације шума, минималног детектабилног сигнала и времена одзива, као и побољшања селективности сензора. Такође, оно је неопходно за правилну интерпретацију мерних резултата и развој нових мерних метода. Практична примена резултата очекује се у већем броју техничких система, а посебно код бежичних сензорских мрежа за надзор параметара животне средине.

Релевантни библиографски извори из области предложене дисертације:

1. Arlett J. L., Myers E. B., Roukes M. L.: *Comparative advantages of mechanical biosensors*, Nature Nanotechnology, Vol. 6, 2011, pp. 203-215.

2. Lavrik N. V., Sepaniak M. J., Datskos P. G., *Cantilever transducers as a platform for chemical and biological sensors*, Rev. Sci. Instrum., Vol. 75, 2004, pp. 2229–2253.
3. Boisen A., Dohn S., Keller S. S., Schmid S., Tenje M., *Cantilever-like micromechanical sensors*, Rep. Prog. Phys. Vol. 74, 2011, pp. 036101 1-31.
4. Faegh S., Jalili N., Sridhar S.: *A Self-Sensing Piezoelectric MicroCantilever Biosensor for Detection of Ultrasmall Adsorbed Masses: Theory and Experiments*, Sensors, Vol. 13, 2013, pp. 6089-6108.
5. Zheng G., Gao X. P. A., Lieber C. M., *Frequency Domain Detection of Biomolecules Using Silicon Nanowire Biosensors*, Nano Lett., Vol. 10, 2010, pp. 3179–3183.
6. Chen C.-H., Hwang R.-Z., Huang L.-S., Lin S., Chen H.-C., Zang Z.-C., Lin Z.-T., Zu S.-A., Wang Z.-H., Chou N.-K., Lu S. S.: *A Wireless Bio-MEMS Sensor for C-Reactive Protein Detection Based on Nanomechanics*, IEEE International Conference on Solid-State Circuits ISSCC 2006, San Francisco 2006., pp. 2298-2307.
7. Warneke B. A., Pister K. S. J.: *MEMS for distributed wireless sensor networks*, Proc. 9th International Conference on Electronics, Circuits and Systems, Vol. 1, 2002, pp. 291-294.
8. Britton C. L., Warmack R. J., Smith S. F., Oden P. I., Jones R. L., Thundat T., Brown G. M., Bryan W. L., Depriest J. C., Ericson M. N., Emery M. S., Moore M. R., Turner G. W., Wintenberg A. L., Threath T. D., Hu Z., Clonts L. G., Rochelle J. M.: *Battery-powered, wireless MEMS sensors for high-sensitivity chemical and biological sensing*, Proc. 20th IEEE Conference on Advanced Research in VLSI, Atlanta 1999., pp. 359-368.
9. Wang J., Qu X., *Recent progress in nanosensors for sensitive detection of biomolecules*, Nanoscale, Vol. 5, 2013, pp. 3589-3600.
10. Chaste J., Eichler A., Moser J., Ceballos G., Rurali R., Bachtold A., *A nanomechanical mass sensor with yoctogram resolution*, Nature Nanotechnology, 2012, Vol. 7, pp. 301–304.
11. Schedin F., Geim A. K., Morozov S. V., Hill E. W., Blake P., Katsnelson M. I., Novoselov K. S., *Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene*, Nature Materials, Vol. 16, 2007, pp. 652.
12. Rumyantsev S., Liu G., Shur M. S., Potyrailo R.A., Balandin A. A., *Selective gas sensing with a single pristine graphene transistor*, NanoLetters, 2012, Vol. 12, pp. 2294-2295.
13. Mohd-Yasin F., Nagel D. J., Korman C. E., *Noise in MEMS*, Meas. Sci. Technol., Vol. 21, 2010, pp. 012001 1–22.
14. Van Vliet C.M., *Macroscopic and microscopic methods for noise in devices*, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 41, 1994, pp. 1902–1915.
15. Van Vliet K.M., Fasset J. R., *Fluctuations due to electronic transitions and trans-port in solids*, in: R.E. Burgess (Ed.), Fluctuation Phenomena in Solids, Academic Press, New York, 1965, pp. 267–352.
16. Vidybida A. K.: *Adsorption-desorption noise can be used for improving selectivity*, Sens. Actuators A, Vol. 107, 2003, pp. 233–237

3. Полазне хипотезе

Код сензора чији је одзив одређен бројем адсорбованих честица, брзина одзива сензора и вредност излазног сигнала у устаљеном стању у идеалном случају зависе само од параметара адсорпционо-десорпционог процеса циљних честица. У реалним ситуацијама, и други процеси који се дешавају у окружењу сензорског елемента или на његовој површини, а спрегнути су са АД процесом циљних честица, такође утичу на временски одзив сензора. Истраживања временског одзива, која се предлажу, надовезују се на резултате објављене у

литератури, који се односе на разматрање појединачних утицаја различитих процеса. Планираном анализом ће бити проверена претпоставка да је за интерпретацију мерних резултата неопходно развити и користити нове, унапређене моделе, који истовремено узимају у обзир све процесе од значаја за генерисање одзива сензора. Такође, узимајући истовремено у обзир све релевантне процесе, биће испитана оправданост примене апроксимативних модела који се уобичајено користе за анализу одзива сензора.

Пошто стохастичке флукуације броја адсорбованих честица проузрокују флукуације мерног параметра и излазног сигнала сензора, претпоставља се да сви процеси спрегнути са стохастичким АД процесом могу значајно да утичу на случајне флукуације излазног сигнала, тј. да утичу на АД шум сензора. У оквиру предложених истраживања биће развијени теоријски модели и извршена анализа АД шума, који ће омогућити проверу ове хипотезе. Претпоставља се да спектрална густина средње снаге (СГСС) АД шума може да се користи као извор информација о параметрима супстанце која се адсорбује и процеса који су битни за генерисање одзива, што може да послужи за развој нових метода за идентификацију супстанци у окружењу и за карактеризацију датих процеса на основу анализе флукуација одзива у фреквенцијском домену. Ова претпоставка ће такође бити проверена планираном анализом АД шума.

4. Научне методе истраживања

Рад на докторској дисертацији обухватиће следеће научне методе истраживања:

- систематско проучавање доступне литературе из области дисертације,
- теоријско разматрање и дефинисање математичко-физичких модела МЕМС сензора заснованих на реверзибилној адсорпцији, који обухватају све процесе битне за генерисање одзива у различитим случајевима од практичног значаја,
- примену аналитичких и нумеричких метода, као и рачунарских симулација, за анализу временског одзива сензора у датим случајевима, полазећи од развијених теоријских модела,
- формулисање стохастичких модела за анализу случајних флукуација одзива у различитим случајевима од практичног значаја,
- коришћење приступа статистичке теорије Марковљевих случајних процеса (приступ заснован на мастер-једначини и приступ заснован на Ланжевеновој стохастичкој једначини, са применом Винер-Хинчинове теореме) за одређивање статистичких параметара (СГСС, аутокорелационе функције, математичког очекивања, варијансе) стохастичке компоненте одзива, на основу формулисаних стохастичких једначина,
- квалитативну и квантитативну анализу утицаја различитих процеса и параметара сензора на граничне перформансе сензора, коришћењем изведених аналитичких израза за СГСС АД шума у различитим случајевима,
- приказ и дискусију постигнутих резултата, укључујући поређење са резултатима из постојеће литературе и проверу полазних хипотеза, као и разматрање практичних примена резултата истраживања.

5. Очекивани научни допринос

Развојем математичко-физичких модела флукуационих процеса код МЕМС био/хемијских сензора, који истовремено узимају у обзир већи број физичких феномена битних за њихово функционисање, биће остварени нови научни резултати на међународном нивоу. Пошто ће бити свеобухватнији од постојећих модела, они ће омогућити тачнију процену укупног шума и минималног детектабилног сигнала сензора. Аналитички изрази за СГСС флукуација сигнала, који ће бити изведени, омогућиће да први пут буде извршена квантитативна анализа АД шума у вишедимензионом простору параметара. Ови резултати ће имати практични значај јер омогућују развој сензора унапређених перформанси, побољшање

постојећих мерних метода, као и развој нових метода, заснованих на анализи флукуација сигнала у фреквенцијском домену, укључујући методе детекције већег броја супстанци једним сензором. Резултати анализе временског одзива сензора у случајевима од практичног значаја ће омогућити правилну интерпретацију мерних резултата и оптимизацију сензора и експерименталних услова. Сви поменути резултати имају шири научни значај, јер су, осим код МЕМС сензора, применљиви код свих хемијских и биолошких сензора заснованих на адсорпцији, као и код других МЕМС направа (високофреквенцијских резонатора и осцилатора).

6. План истраживања и структура рада

У првој фази истраживања биће извршено детаљно проучавање доступне литературе, како би се стекао увид у актуелно стање у научној области дисертације.

Друга фаза ће обухватити теоријско разматрање и дефинисање математичко-физичких модела МЕМС сензора заснованих на реверзибилној адсорпцији, неопходних за анализу временског одзива. Математички аспект општег теоријског модела којим су обухваћени сви процеси од значаја за генерисање одзива сензора, изузетно је сложен. Зато ће за одређене случајеве од практичног значаја прво бити дефинисани поједностављени физички модели и представљени одговарајућим скуповима полазних једначина. На основу њих ће се, затим, вршити анализа временског одзива сензора у датим случајевима, применом аналитичких и нумеричких метода, као и рачунарских симулација.

У трећој фази ће бити формулисани стохастички модели за анализу случајних флукуација одзива сензора, засновани на физичким моделима дефинисаним у претходној фази, за исте, практично значајне случајеве. Коришћењем формулисаних стохастичких једначина биће одређена СГСС и други статистички параметри стохастичке компоненте одзива. У случајевима у којима се покаже да је неопходно, биће уведене апроксимације које ће омогућити добијање аналитичких израза, а оправданост апроксимација ће бити проверена применом рачунарских симулација. Такође, биће дефинисани опсежи важења апроксимативних решења у функцији параметара система. Коришћењем изведених аналитичких израза за СГСС АД шума, биће извршене квалитативна и квантитативна анализа утицаја различитих процеса и параметара сензорског елемента на граничне перформансе сензора.

Четврта фаза ће бити посвећена приказу и дискусији свих постигнутих резултата у претходним фазама истраживања. Биће извршено поређење добијених резултата са резултатима приказаним у постојећој литератури, као и провера полазних хипотеза. Биће размотрене могућности за практичне примене резултата истраживања.

Планира се објављивање резултата истраживања у научним публикацијама.

Пета фаза (завршна) обухвата припрему текста докторске дисертације.

7. Закључак и предлог

Ивана Јокић је пријавила своју докторску дисертацију под насловом **"Адсорпционо-десорпциони шум и временски одзив МЕМС хемијских и биолошких сензора"** у складу са Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду, подневши на увид сва предвиђена документа.

Из достављене документације, која укључује и библиографију до сада објављених радова и прегледа научноистраживачких пројеката у којима је учествовала, може се закључити да Ивана Јокић испуњава све формалне и суштинске услове за приступање изради докторске дисертације. На основу образложења предмета и циљева истраживања, полазних хипотеза истраживања, као и очекиваних научних доприноса и плана истраживања, закључујемо да је

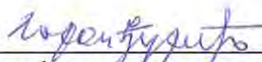
предложена тема научно актуелна и да омогућује да се у оквиру ње остваре значајни научни и стручни доприноси у области МЕМС сензора и њихове примене.

На основу изложеног, Комисија предлаже Научно-наставном већу Електротехничког факултета у Београду да кандидату **мр Ивани Јокић** одобри израду докторске дисертације под насловом "**Адсорпционо-десорпциони шум и временски одзив МЕМС хемијских и биолошких сензора**". За ментора се предлаже др Мирослав Л. Дукић, редовни професор на Електротехничком факултету у Београду, који је био и ментор магистарског рада кандидата. Као други ментор предлаже се др Зоран Ђурић, научни саветник, Институт техничких наука САНУ.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Мирослав Л. Дукић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Зоран Ђурић, научни саветник, ред. члан САНУ
Институт техничких наука САНУ



др Јован Радуновић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Предраг Иваниш, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет