

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ФАКУЛТЕТА У БЕОГРАДУ

На 752. седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду, одржаној 04.09.2012. године, одређени смо за чланове Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације Иване Миловановић, дипломираног инжењера електротехнике, под насловом „Синергије хода особа после можданог удара: импликације за управљање асистивним системима на бази електричне стимулације“. Након прегледа добијеног материјала, Наставно-научном већу Електротехничког факултета подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Ивана Миловановић је рођена у Панчеву 1983. године. Гимназију „Урош Предић“ у Панчеву завршила је 2002. године, а дипломирала је на петогодишњем програму на Електротехничком факултету Универзитета у Београду 2007. године на смеру Нуклеарна и медицинска техника. Тема дипломског рада је „Развој DC/DC конвертора за мишићни стимулатор“, под руководством проф. др Дејана Поповића.

Кандидаткиња је од марта 2008. године била запослена на Електротехничком факултету Универзитета у Београду као сарадник на пројекту. Исте године је Ивана уписала докторске студије на смеру Управљање системима и обрада сигнала на коме је са одличним успехом положила све испите и завршила све обавезе.

У свом досадашњем раду, дипл. инж. Ивана Миловановић је самостално или у сарадњи са другим ауторима објавила 1 рад у међународном часопису, 1 рад у домаћем часопису, 5 радова на међународним конференцијама и 7 радова на конференцијама националног значаја.

Рад који се директно односи на проблем који се проучава у докторској тези је објављен у међународном часопису са СЦИ листе:

I. Milovanović, D.B. Popović, “Principal component analysis of gait kinematics data in acute and chronic stroke patients”, Computational and Mathematical Methods in Medicine, 2012:649743, 2012. <http://www.hindawi.com/journals/cmmm/2012/649743/>, са импакт фактором 0,814 за 2010. годину (M23).

Поред тога, учествовала је у реализацији пројекта технолошког развоја МНТР Републике Србије (ЕТ11019, МНТР, „Електронски систем за управљање покретима особа са инвалидитетом“, руководилац пројекта: проф. др Дејан Поповић. Ивана је у оквиру сарадње Факултета са предузећем Фатроник Србија допринела развоју система за аквизицију хода, и то у домену унапређења мерног система.

Научноистраживачки рад Иване Миловановић у оквиру докторских студија био је усмерен на следеће области: биомедицинско инжењерство, медицинску инструментацију, рехабилитацију покрета, клиничко инжењерство, моторну контролу и биомеханику.

Већина предмета на докторским студијама је била тесно повезана са облашћу којом се кандидаткиња бави. Кандидаткиња је положила све испите са докторских студија са просечном оценом 10.

СПИСАК ПУБЛИКАЦИЈА КАНДИДАТА:

Радови у међународним часописима:

- 1) **I. Milovanović**, D.B. Popović, "Principal component analysis of gait kinematics data in acute and chronic stroke patients", *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, online November 14, 2011. <http://www.hindawi.com/journals/cmmm/aip/649743/>

Радови у домаћим часописима:

- 1) S. Došen, **I. Milovanović**, "Design of Optimal Profiles of Electrical Stimulation for Restoring of the Walking.", *Journal of Automatic Control*, 19(1):13-18, 2009.

Радови на међународним конференцијама:

- 1) **I. Milovanović**, U. Mitrović, N. Malešević, J. Cvetić. "Development of Rotary Spark Gap for aTesla Coil Apparatus.", *Marie Curie Workshop*, October 7-11, Zagreb, Belgrade (Croatia, Serbia);2006.
- 2) M. Djuric-Jovičić, **I. Milovanović**, N. Jovičić, D.B. Popović. "Reproducibility of "BUDA" multisensor system for gait analysis.", In: *Proceedings of the IEEE Region 8 EUROCON 2009 Conference*, May 18-23, St Petersburg (Russia); 2009. pp. 108-11
- 3) M. Djuric-Jovičić, **I. Milovanović**, N. Jovičić, D.B. Popović. "Walkaround assisted walking of stroke patients.", In: *Proceedings of the World Conference on Medical Physics and Biomechanical Engineering*, September 7-12, Munich (Germany); 2009. pp. 299-301.
- 4) S. Došen, **I. Milovanović**, D.B. Popović. "Method for control of electrical stimulation for assisting of the walking in hemiplegic patients.", In: *Proc. 17th ISEK Congress*, June 16-19 2010, Aalborg, Denmark. ISBN: 978-87-7094-047-4.
- 5) **I. Milovanović**, M. Djurić-Jovičić. "Polymyography during hemiplegic walking: Implications for control of FES.", *Proc of IFESS*, Sept 8-12, 2010, Vienna, Austria, pp.203-205. Printed as Abstract in *Artificial Organs*, 34(8): A35 (Abstract).

Радови публиковани у зборницима на домаћим конференцијама:

- 1) U. Mitrović, N. Malešević, **I. Milovanović**, M. Popović. "Evaluacija sistema za detekciju faze zamaha hoda upotrebom akcelerometra ADXL311.", In: *Proceedings of the 51st ETRAN Conference*, June 4-8, Herceg Novi (Montenegro); 2007.
- 2) **I. Milovanović**, N. Malešević, D.B. Popović. "Evaluacija sistema za merenje sile reakcije podloge.", In: *Proceedings of the 52nd ETRAN Conference*, June 8-12, Palic (Serbia); 2008.
- 3) **I. Milovanović**. "Radial Basis Function (RBF) networks for improved gait analysis.", In: *Proceedings of the 9th Symposium on Neural Network Applications in Electrical Engineering*,

- NEUREL 2008, September 25-27, Belgrade (Serbia); 2008. pp. 129-132.
- 4) M. Djurić-Jovičić, **I. Milovanović**, N. Jovičić, S. Radovanović. "Gait analysis: BUDA vs. GAITRITE.", In: Proceedings of the 53rd ETRAN Conference, June 15-18, Vrnjacka banja (Serbia); 2009.
 - 5) N. Miljković, **I. Milovanović**, J. Kojović. "Multi-channel EMG for studying motor control.", In: Proceedings of the 53rd ETRAN Conference, June 15-18, Vrnjacka banja (Serbia); 2009.
 - 6) **I. Milovanović**, D.B. Popović. "Mapping of Sensory Representation of Walking and EMG of Prime Joint Movers: Control of Functional Electrical Stimulation.", X Symposium on Neural Network Applications in Electrical Engineering, NEUREL 2010, 23-25 September 2010, Belgrade, Serbia. 2010. pp. 7-10, ISBN: 978-1-4244-8818-6.
 - 7) M. Djurić-Jovičić, **I. Milovanović**, D.B. Popović. "Statistical method for gait classification based on data recorded with inertial sensors", Book of abstracts from Symposium of clinical neurophysiology with international participation, 4. November 2010, Belgrade, Serbia, pp.33.

2. ПРЕДМЕТ И ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

2.1 Предмет истраживања

Готово да не постоји обољење као мождани удар, које у својој основи обједињује оштећења свих сегмената живота. Као последица можданог удара настају, не само физичка, већ и ментална и емоционална оштећења. Важне клиничке манифестације, поред поремећаја говора, психичких испада и поремећаја свести, су и поремећаји покрета и хода.

Ходање је важна компонента самосталности и неопходан чинилац низа животних активности. Успостављање хода зато заузима важно место у рехабилитацији пацијената после можданог удара и предмет је изучавања многобројних клиничких студија. Технике рехабилитације хода су засноване на неуропластицитету тј. моторном учењу.

У рехабилитацији хода најчешће се употребљавају, појединачно или у комбинацији: класичне рехабилитационе технике (принцип неурофизиолошког и моторног учења), роботске направе, *brain-computer interface* (БЦИ) и функционална електрична стимулација (ФЕС).

Ова докторска дисертација је настала као део развоја система за асистенцију ходања применом електричне стимулације. Познато је да електрична стимулација омогућава активацију парализованих мишића, пре свега омогућујући смањен природни ток информација које потичу од централног нервног система. Овај принцип је често коришћен за терапију особа после можданог удара који резултује хемиплегијом, тј. једностраном парализом тела. У ранијим истраживањима је модел управљања био базиран на копирању синергија које су карактеристичне за здраве испитанике. У тим истраживањима су доминантна два приступа: управљање са повратном спрегом на бази детаљног модела хода, и сензорски управљана стимулација на бази неаналитичког модела хода. У мерењима карактеристика хода је уочено да постоји значајна акомодација управљања непарализованим деловима тела у циљу компензације и генерисања стања које омогућава интеграцију покрета парализованих (паретичних) екстремитета.

Ова сазнања су допринела развоју идеје да је потребно детаљно истражити карактеристике хода особа после можданог удара са циљем формирања модела који се може имплементирати у

систем који користи вишеканалну електричну стимулацију, а који резултује генерисањем активности мишића које на оптималан начин доприносе опоравку хода.

2.2 Циљ истраживања.

Основни циљ истраживања је развој методе за праћење карактеристика хода (кинематике и динамике) и карактеристика мишићне активности при ходу у клиничким условима.

С обзиром да се кораци у току хода могу карактерисати као случајан процес, у анализу ће бити интегрисани статистички модели који посматрају ход као стохастички процес.

У раду ће бити посвећена пажња и динамичком моделирању хода, јер се неки елементи процеса не могу посматрати само на основу мерења кинематике, већ и на основу познавања сензорно-моторног система који је одговоран за локомоцију.

2.3 Осврт на релевантне библиографске изворе

Недостатак контролног система који би резултовао покретима интегрисаним у биолошке управљачке шеме један је од највећих проблема за ефикасну примену асистивних технологија. Убеђење о унилатералном моторном дефициту, као и директно копирање здравих синергија хода, довело је до тога да највећи број система, упркос непрестаном технолошком напретку, никада није напустио оквире клиничких испитивања. Постоји мали број асистивних система који су наишли на прихватање клиничара и система здравствене заштите, па самим тим постоји само неколико комерцијалних производа у широј употреби [1,2].

У највећем броју студија моторни дефицит – хемиплегија (хемипареза) се сматрао унилатералним. Међутим, управљање ходом од стране нервног система је билатерално организовано, са циљем да омогући координисану симетричну активност ногу. Самим тим, мишићна активност парализоване (паретичне) ноге је у великој мери под утицајем сензорно-моторног стања непаретичне (здраве) ноге а наравно и тела код ког постоји у мањој мери изражена асиметричност. Несиметричност доводи и до абнормалности (кинематика и мишићне активације непаретичне ноге [3,4]), а то још више отежава функционисање паретичне ноге и води ка још већем моторном дефициту [5].

Пројектовање контролера за ход до сада је најчешће било засновано на генерисању стимулационих профила на основу снимака мишићних активности здравих особа, мишића покретача зглобова доњих екстремитета [6-10]. Добијени профили коришћени су за стимулацију мишића пацијената, са циљем генерисања покрета што сличнијих покретима здравих особа. Групе мишића узимане у обзир као и њихов број у великој мери варира. Од мањег броја мишића доњих екстремитета [7-9] до детаљних студија од чак 48 снимљених мишића ногу и трупа [10], ове студије су показале ограничену ефикасност.

Међутим, сам приступ коришћења мишићних активација здравих испитаника за активацију паретичних мишића хемиплегичних испитаника има неколико мана:

- 1) Електрична стимулација паретичних мишића резултоваће другачијом мишићном силом у односу на силу коју развијају здрави мишићи,

- 2) Модификовани рефлекс ограничавају индивидуалну контролу мишића хемиплегичних субјеката у односу на контролу мишића код здравих особа,
- 3) Сензорне информације које допиру до виших нивоа централног нервног система су у великој мери модификоване у односу на организацију ових информација код здравих [11].

Потенцијално решење могла би бити стимулација профилима који су прилагођени индивидуалном кориснику. Генерисање стимулационих профила помоћу симулације која користи модел прилагођен кориснику реализовано је у [12-14]. Овим методом, узимају се у обзир инерцијални и мишићни параметри који су одраз дефицита насталог лезијом. Ради увођења коонтракција антагонистичких мишића уобичајено присутних у здравом ходу, поменути метод се користи употпуњен електромиографским снимцима и показује значајну ефикасност [15].

Анализом компоненти постојећих рехабилитационих система заснованих на ФЕС-у, при чему су технолошке компоненте увелико достигле одређену зрелост (квалитетне електроде и конектори, стимулатори базирани на ефикасним микроконтролерима, компактни и лагани сензори у МЕМС технологији), може се закључити да би једино боље разумевање начина на који се контролише ход здравих особа и начина на који су контролни процеси измењени можданим ударом, могло допринети даљем развоју система.

[1] P. Taylor, J. Burridge, A. Dunkerly, D. Wood, J. Norton, C. Singleton, I. Swain. "Clinical use of the Odstock Drop Foot Stimulator: its effects on speed and effort of walking.", *Arch Phys Med Rehabil* 80:1577-83, 1999.

[2] M.H. Cameron, "The WalkAide® Functional Electrical Stimulation System—A Novel Therapeutic Approach For Foot Drop in Central Nervous System Disorders.", *US Neurology*, 6(2):112-114, 2010.

[3] S.C. Tseng, S.M. Morton, "Impaired interlimb coordination of voluntary leg movements in poststroke hemiparesis.", *J Neurophysiol*, 104(1):248-57, 2010.

[4] F. Debaere, D. Van Assche, C. Kiekens, S.M.P. Verschueren, S.P. Swinnen, "Coordination of upper and lower limb segments: deficits on the ipsilesional side after unilateral stroke.", *Exp Brain Res*, 141(4):519-29, 2001.

[5] S.A. Kautz, C. Patten, "Interlimb influences on paretic leg function in poststroke hemiparesis.", *J Neurophysiol*, 93(5):2460-73, 2005.

[6] M. Chen, Q.B. Wang, X.X. Lou, K. Xu, X.X. Zeng, "A foot drop correcting FES envelope design method using tibialis anterior EMG during healthy gait with a new walking speed control strategy.", *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2010: 4906-9, 2010.

[7] S. Mangold, M. R. Popović, and T. Keller, "Muscle activity during normal walking and its relevance for the functional electrical stimulation applications," in *Proc. 7th Vienna Int. Workshop FES*, Vienna, Austria. 2001.

[8] D. T. O'Keefe, A. E. Donnelly, and G. M. Lyons, "The development of a potential optimized stimulation intensity envelope for drop foot applications," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 11, no. 3, pp. 249-256, 2003.

[9] C. A. Byrne, D. T. O'Keefe, A. E. Donnelly, and G. M. Lyons, "Effect of walking speed changes on tibialis anterior EMG during healthy gait for FES envelope design in drop foot correction," *J. Electromyogr. Kinesiol.*, vol. 17, no. 5, pp. 605-616, 2007

[10] R. Kobetic and E. B. Marsolais, "Synthesis of paraplegic gait with multichannel functional neuromuscular stimulation," *IEEE Trans. Rehabil. Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 66-79, 1994.

- [11] Popović DB, Sinkjær T, Popović MB „Electrical stimulation as a means for achieving recovery of function in stroke patients,” J NeuroRehabilitation. Vol 25, no 4, pp. 45-58, 2009.
- [12] D. Popović, R. B. Stein, M. N. Oguztoreli, M. Lebedowska, and S. Jonić, "Optimal control of walking with functional electrical stimulation: A computer simulation study," IEEE Trans. Rehabil. Eng., vol. 7, no. 1, pp. 69-79, 1999.
- [13] S. Došen, D. B. Popović, and C. Azevedo-Coste, "Optiwalk: Un nouvel outil pour la conception et la simulation de lois de commande pour le controle de la marche de patients atteints de deficits moteurs," Journal Europeen des Systemes Automatises, vol. 41, no. 2, pp. 239-259, 2007.
- [14] S. Došen and D. B. Popović, "Accelerometers and Force Sensing Resistors for Optimal Control of Walking of a Hemiplegic," IEEE Trans. Biomed. Eng., vol. BME-55, no. 8, pp. 1973-1984, 2008.
- [15] S. Došen and I. Milovanović, "Design of Optimal Profiles of Electrical Stimulation for Restoring of the Walking," Journal of Automatic Control, University of Belgrade, Vol. 19:13-18, 2009.

3. ПОЛАЗНЕ ХИПОТЕЗЕ

У раду се полази од хипотезе:

- 1) Стохастички модел хода детаљније описује ход и омогућава једноставнију идентификацију постојећих дефицита.
- 2) На основу снимљених сигнала који карактеришу ход пацијента могуће је формирање модела хода који је индивидуалан, а одређује трајекторије и обрасце хода које је потребно наметнути током процеса рехабилитације.
- 3) Постојећи модел је могуће директно имплементирати у систем који примењује вишеканалну функционалну електричну стимулацију (ФЕС).

4. НАУЧНЕ МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА

Методологија истраживања у оквиру предложене докторске дисертације ће обухватити следеће фазе:

- 1) Анализа постојећих метода управљања вишеканалном електричном стимулацијом за рехабилитацију хода и њихових ограничења,
- 2) Снимање карактеристика хода на здравим испитаницима ради формирања модела здравог обрасца хода (*benchmark*),
- 3) Карактерисање хода пацијената након могућег удара користећи инерцијалне сензоре, сензоре силе (реакције подлоге) и записе мишићних активности (ЕМГ),
- 4) Анализа хода на основу уобичајено коришћених параметара хода (брзина, симетрија, трајање једноослоначке и двоослоначке фазе, итд.),
- 5) Анализа хода применом стохастичких метода (нпр., *Principal Component Analysis - PCA*),
- 6) Анализа хода на бази електромиографских сигнала,

- 7) Сумирање резултата и испитивање могућности формирања индивидуалног модела хода који карактерише потенцијалног корисника система.

У истраживању ће бити коришћени следећи хардверски и софтверски елементи:

- 1) Преносиви више-сензорски систем за снимање кинематике хода који укључује гониометре и сензоре силе,
- 2) Сензорски систем за снимање електромиографских (ЕМГ) сигнала са мишића који су доминантни за покрете од интереса,
- 3) Преносиви рачунар за софтверску подршку система,
- 4) *Bluetooth* модул за комуникацију рачунара и сензорског система описаног под 1),
- 5) АД картица за комуникацију рачунара и сензорског система описаног под 2),
- 6) Матлаб програм за обраду снимљених сигнала и примену стохастичке анализе сигнала (ПЦА).

5. ОЧЕКИВАНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

Основни допринос које даје ова докторска дисертација је алат за формирање новог модела хода који се базира на хипотези да су кораци део стохастичког процеса, а чија је директна импликација модел који се може имплементирати на управљање вишеканалним системом за електричну стимулацију.

У оквиру предложене докторске дисертације очекују се следећи резултати:

- 1) Идентификација дефицита контроле управљања и мишићног одговора,
- 2) Развој методе за анализу кинематичких синергија особа са можданим ударом која би омогућила усмеравање рехабилитационог поступка ка индивидуалним потребама пацијента а самим тим и ефикаснију терапију,
- 3) Развој алата за формирање модела хода који би се користио у систему вишеканалне електричне стимулације.

6. ПЛАН ИСТРАЖИВАЊА И СТРУКТУРА РАДА

У оквиру детаљне анализе литературе везане за системе управљања вишеканалном електричном стимулацијом за рехабилитацију хода, биће размотрене различите методе управљања и њихова ограничења. Снимање карактеристика хода на здравим испитаницима биће извршено ради формирања модела здравог обрасца хода. Преносивим више-сензорским системом и скупом одговарајућих сензора биће снимљене кинематичке карактеристике хода пацијената након можданог удара. Као сензор силе, биће коришћен улошак за ципелу који је развијен и унапређен у Лабораторији за биомедицинско инжењерство, Електротехничког факултета у Београду. Системом за вишеканално снимање електромиографских сигнала (ЕМГ), биће снимљене мишићне активности мишића који су доминантни за покрете од интереса. У овом случају биће размотрена

два модалитета хода, ход са штапом и ход са моторизованом ходалицом Walkaround. Сва снимања биће обављена на Институту за рехабилитацију „Др Мирослав Зотовић“. У студији ће учествовати пацијенти са дијагнозом акутне (мање од 6 недеља након можданог удара), суб-акутне (од 6 недеља до 6 месеци након можданог удара) и хроничне фазе хемиплегије (више од 6 месеци након можданог удара). За обраду и анализу података биће коришћен програмски пакет МАТЛАБ, математичко и симулационо окружење за математичке прорачуне, симулирање и анализу процеса.

Предложена дисертација садржаће следећа поглавља:

- 1) Уводна разматрања,
- 2) Сензорски системи за аквизицију сигнала хода,
- 3) Кинематичка анализа хода након можданог удара,
- 4) Електромиографска анализа хода након можданог удара,
- 5) Закључне напомене са главним доприносима, и
- 6) Препоруке за даљи рад.

У првом делу ће бити описани механизми настанка можданог удара и његове манифестације у виду различитих поремећаја хода. Биће дат преглед техника и терапија које се користе у рехабилитацији хода након можданог удара. Затим ће бити детаљније размотрена једна од рехабилитационих техника, функционална електрична стимулација (ФЕС) кроз анализу различитих система који у себе интегришу ФЕС, њихових предности и недостатака.

У другом делу ће бити описани сензорски системи који су коришћени у клиничним испитивањима. Биће дат кратак преглед коришћених индустријских сензора као и детаљан опис сензора силе развијеног у оквиру Лабораторије за биомедицинско инжењерство, чија је форма накнадно прилагођена потребама истраживања, тестирана и употребљена у студији.

Трећи део ће садржати кинематичку анализу хода након можданог удара, у оквиру које ће бити упоређене уобичајено коришћене клиничке мере опоравка са примењеним стохастичким методама. Акценат ће бити на моторним дефицитима и компензационим кинематичким синергијама које се јављају. Биће показане предности развијене технике у односу на уобичајене мере, као и значај овакве анализе за реализацију рехабилитационог програма прилагођеног индивидуалним потребама пацијента.

У четвртм делу биће представљена електромиографска (ЕМГ) анализа хода након можданог удара, у којој ће бити размотрене синергије мишићних активација приликом хода пацијената са две различите асистивне направе (штап и моторизована ходалица). На основу поређења мишићних синергија пацијената са синергијама здравих испитаника, биће идентификовани дефицити.

Последња поглавља укључиће преглед резултата истраживања, предности и ограничења поменутог поступка. Биће размотрена могућност коришћења постојеће анализе за формирање модела применљивог на вишеканалну електричну стимулацију.

7. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу изложеног, Комисија констатује да кандидат испуњава све формалне и суштинске услове за приступање изради докторске дисертације, као и да је предложена тема „Синергије хода особа после možданог удара: импликације за управљање асистивним системима на бази електричне стимулације“ научно актуелна у области биомедицинског инжењерства. Резултати до којих би кандидат требало да дође, имаће значајан допринос у домену пројектовања уређаја за рехабилитацију хода на бази електричне стимулације. Зато Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да кандидату Ивани Миловановић одобри израду докторске дисертације са наведеним насловом. За ментора докторске дисертације предлажемо др Дејана Поповића, редовног професора Електротехничког факултета, Универзитета у Београду, због истакнутих доприноса из области рехабилитационог инжењерства и моторне контроле, што је уједно и ужа научна област дисертације.

У Београду, 04.09.2012.

Чланови Комисије:

др Дејан Поповић, дописни члан САНУ, редовни професор
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

др Мирјана Поповић, редовни професор
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

др Љубица Константиновић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Медицински факултет