

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Оцена научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Слободана Вукојичића за израду докторске тезе.

Одлуком бр. 266/34 од 10.02.2026. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Слободана Вукојичића под насловом „Адаптивно предиктивно управљање резонантним механичким системима применом концепта дигиталних близанаца”, односно на енглеском „Adaptive Predictive Control of Resonant Mechanical Systems based on Digital Twin Concepts”.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Слободан Вукојичић је рођен 21.03.1995. године у Краљеву. Завршио је основну школу "Попински борци" у Врњачкој Бањи. Упоредо са основном школом похађао је нижу музичку школу „Стеван Стојановић Мокрањац“ у Врњачкој Бањи. Нижу музичку школу завршио је на одсеку за клавир. Уписао је гимназију у Врњачкој Бањи коју је завршио са одличним успехом.

Електротехнички факултет уписао је 2014. године. Дипломирао је на одсеку за Енергетику 2018. године са просечном оценом 8,53. Дипломски рад под називом „Развој алгоритма и лабораторијског модела за оптимално управљање малим хидроагрегатом са променљивом брзином обртања“ одбранио је у јулу 2018. године са оценом 10. Дипломски рад је проглашен најбољим радом у 2018. години на Електротехничком факултету. Ментор дипломског рада био је др Жељко Ђуришић.

Дипломске академске – мастер студије на Електротехничком факултету у Београду, на модулу за Енергетску ефикасност уписао је у октобру 2018. године. Положио је већину испита са оценом 10. Мастер студије завршио је са просечном оценом 9,33. Мастер рад под називом „Развој симулационог окружења за симулацију електромоторних погона у реалном времену“ одбранио је у јануару 2020. године са оценом 10. Ментор мастер рада био је др Милан Бебић.

Докторске студије на модулу за Енергетске претварааче и погоне Електротехничког факултета у Београду уписао је школске 2020/2021. године. Тренутно је студент треће године докторских студија са 7 положених испита са просечном оценом 10,00.

За време трајања дипломских и мастер студија био је активан члан у студентским пројектима IFES „H-bridges“ као и формула студент „Друмска стрела“ у којима су се развијала напредна решења у областима енергетских претвараача као и развој првог електричног болида у Србији.

Јануара 2019. године запослио се на позицији млађи инжењер за израду софтвера и пуштање постројења у рад у фирми Мика Пројект Сервис. Дизајнирао је више софтвера за рад машина и спровео пуштање у рад два прототипа машина у металној индустрији које се налазе у Немачкој и Кини. Бавио се напредним симулацијама које су коришћене за тестирање софтвера и напредног пуштања машина у рад.

Током јануара 2022. године прешао је у компанију Schneider Electric на позицију пројектног инжењера за архитектуру података. Од почетка је преузео рад на дизајну и развоју напредних решења за управљање дистрибутивним системима за више клијената широм света. Највећи пројекти на којима је радио су израда мрежног и SCADA модела за дистрибутивне мреже Белгије, Хонг Конга, Берлина као и Торонта. Такође је водио развој као главни инжењер за израду мрежног и SCADA модела за дистрибутивне мреже Португала, Шпаније и Бразила као део дистрибуције једног клијента.

Аутор је шест научних радова, од којих један објављен у часопису са SCI листе, са три рада је учествовао на међународним конференцијама, док је са остала два учествовао на домаћим конференцијама.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Слободан Вукојичић положио је следеће испите на докторским студијама:

Р.бр.	Шифра	Назив предмета	Оцена	ЕПСБ	Датум
1	19Д011ЕЕФ	Електромоторни погон као рационалан и квалитетан потрошач електричне енергије	10 (десет)	9	05.07.2023.
2	19Д011ИЕП	Интеграција електромоторних погона у сложене системе покретања и управљања	10 (десет)	9	06.07.2023.
3	19Д031МСКС	Моделовање саобраћаја у М2М комуникационим системима	10 (десет)	9	03.07.2023.
4	19Д051НМ	Неуралне мреже	10 (десет)	9	20.08.2022.
5	19Д011ВЕП	Вишемоторни електрични погони	10 (десет)	9	18.09.2021.
6	19Д031ДОС	Дигитална обрада сигнала	10 (десет)	9	26.09.2021.
7	19Д011ИЕМ	Испитивање и одржавање електричних машина	10 (десет)	9	03.09.2021.
Р.бр.		Назив обавезе		ЕПСБ	
1		Студијско истраживачки рад I		24	30.09.2021.
2		Студијско истраживачки рад II		24	05.09.2023.
		Укупно остварено		111	

Кандидат је аутор шест научних радова, од којих један објављен у часопису са SCI листе, са три рада је учествовао на међународним конференцијама, док је са остала два учествовао на домаћим конференцијама.

Списак радова је дат у наставку у складу са важећом категоризацијом.

Категорија М20 – Радови објављени у научним часописима од међународног значаја:

1. S. Vukojičić, L. Ristić, G. Kvašček, *Industrial application of neural network-optimized model predictive control for a two mass resonant mechanical system*, Electrical Engineering 2025, Vol. 107, pp. 14121 -14136, July, 2025, <https://doi.org/10.1007/s00202-025-03261-x> (M22, IF 1.9)

Категорија М30 – Радови објављени у зборницима конференција од међународног значаја:

1. S. Vukojičić, S. Pavlović and L. Ristić, *Passive, active and hybrid filters as a part of the energy efficient electrical drives curriculum*, 20th International Symposium on Power Electronics (Ee2019), pp. 1-6, Novi Sad, Serbia, Oct, 2019, doi: 10.1109/PEE.2019.8923030 (M33)
2. S. Vukojičić, L. Ristić and G. Kvašček, *Comparison between PI and Model Predictive Control of Two Mass Resonant Mechanical System*, 7th International Conference on Environment Friendly Energies and Applications (EFEA), pp. 1-6, Bagatelle Moka MU, Mauritius, Dec, 2022, doi: 10.1109/EFEA56675.2022.10063789 (M33)
3. S. Vukojičić, L. Ristić and G. Kvašček, *Model Predictive Control of Two Mass Resonant Mechanical System Optimized by Neural Network*, 7th International Conference on Environment Friendly Energies and Applications (EFEA), pp. 1-6, Bagatelle Moka MU, Mauritius, Dec, 2022, doi: 10.1109/EFEA56675.2022.10063833 (M33)

Категорија М60 – Радови објављени у зборницима конференција од националног значаја:

1. С. Вукојичић, Ж. Ђуришић, П. Грбовић, *Анализа ефикасности хидроагрегата мале снаге са асинхроним генератором прикљученим преко претварача на дистрибутивну мрежу*, Р Ц6 03, Саветовање за велике електричне мреже - CIGRE 2019, Врњачка Бања, јун, 2019. (M63)
2. Б. Ђеранић, С. Вукојичић, М. Новичић, Г. Квашчев, Л. Ристић, *Примена неуралних мрежа за естимацију немерљивих параметара у индустријским процесима*, 37. саветовање CIGRE Србија, мај, 2025 (M63)

Дана 26.02.2026. године кандидат Слободан Вукојичић је на Електротехничком факултету у Београду успешно одбранио тему докторске дисертације на усменој одбрани пред Комисијом:

1. др Милан Бебић, ванредни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет (председник Комисије)
2. др Веран Васић, редовни професор, Универзитет у Новом Саду – Факултет техничких наука
3. др Горан Квашчев, редовни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Комисија је анализирао претходно наведене досадашње резултате рада кандидата. На основу извршене анализе, као и на основу усмене одбране теме докторске дисертације, Комисија је формирала позитиван став у вези са способностима кандидата за рад на предложеној теми докторске дисертације. Разлози за то су резултати досадашњег рада и оствареног искуства у области којом се бави докторска дисертација, о чему сведоче објављени радови. Због претходно наведеног, Комисија сматра да је кандидат подобан за рад на предложеној теми докторске дисертације.

2. Предмет и циљ истраживања

Предмет ове докторске дисертације је унапређење система управљања механичким резонантним системима (енг. *Mechanical Resonant System*) [1] коришћењем методе адаптивног предиктивног управљања (енг. *Model Predictive Control - MPC*) остварене применом неуралне мреже подржане физичким законима (енг. *Physics Informed Neural Network - PINN*) и интеграцијом дигиталног близанаца (енг. *Digital Twin*). Фокус је на побољшању управљачких карактеристика система, пригушењу осцилација брзине механичког резонантног система и постизању робусности на промене механичких параметара и утицаје спољашње средине.

Предиктивне методе управљања комплексним системима представљају идеалан избор у поређењу са класичним методама заснованим на пропорционално-интегрално-диференцијалним (ПИД) регулаторима, јер ефикасно пригушују природне осцилације система и омогућавају довођење система у стабилно радно стање [2][7]. Највећи изазов код предиктивних метода управљања огледа се у потреби за познавањем математичког модела управљаног система, као и прецизних вредности механичких параметара који фигуришу у одговарајућим једначинама [8][9]. У савременој пракси се механички параметри обично одређују мерењем или прорачуном пре пуштања машина у рад, што може довести до нестабилности система у случају промене вредности једног или више механичких параметара.

Савремени индустријски процеси подразумевају континуалну или скоковиту промену механичких параметара система, као што су момент инерције оптерећења, коефицијент крутости вратила, као и коефицијент вискозног трења [10]-[17]. Иако промене ових параметара немају исти утицај на стабилност система и на промену природне учестаности осцилација, сви они фигуришу у математичким једначинама које описују механички осцилаторни систем. Најизраженије промене јављају се у кризним ситуацијама, као што су нпр. појава микроруптура на вратилу, услед чега долази до смањења коефицијента крутости, или замена управљаног алата или терета, при чему се мења вредност момента инерције оптерећења [18].

Индустријски процеси у којима се могу уочити овакве промене механичких параметара обухватају ваљачке станове, летеће маказе, производњу танке металне, папирне и картонске траке и друге сродне процесе. Једна од савремених апликација која има широку употребу, а код које се могу уочити промене механичких параметара, јесте роботска рука. Промене преносивог терета у овом случају могу се моделовати као варијабилни момент инерције оптерећења, док се издужење или скраћење роботске руке моделује променљивим коефицијентом крутости.

У оквиру тезе биће анализирана адаптивна својства предиктивног управљања у погледу прилагођавања променама механичких параметара који фигуришу у математичком моделу система. Адаптивност ће бити разматрана за промене сва три кључна параметара (момент инерције оптерећења, коефицијент крутости вратила и коефицијент вискозног трења) у одређеном опсегу око иницијално одређених вредности [18]. Поред тога, теза ће обухватати анализу перформанси дигиталног близанца механичког система који је имплементиран на серверу и који комуницира са управљачким делом физичког близанца (енг. *Physical Twin*) реализованим у индустријском процесору (*Programmable Logic Controller - PLC*) путем интернет протокола [19]-[22]. Улогу дигиталног близанца чине две функције:

- извршење сигурносне команде за заустављање (*Safe Torque Off - STO*) која треба да заустави погон у случају кризних ситуација [23],[24] и представља додатну сигурност.
- естимација механичких параметара система применом неуралних мрежа подржаних физичким законима [25]-[29].

У кризним ситуацијама, правовремено издавање сигурносне команде је од пресудног значаја, јер оператер који управља машином није увек у могућности да благовремено реагује и заустави машину, било због удаљености од управљачког места, било због недовољно јасне процене ситуације. Применом дигиталног близанца се битно скраћује време рада машине ван нормалних услова чиме се повећава сигурност, додатна заштита људских живота, али и обезбеђује очување механичких делова опреме. Пре свега, биће разматран утицај промена механичких параметара ван очекиваног опсега на издавање сигурносне команде, као и утицај неправилности у функционисању система, као што су непричвршћеност конструкције (*looseness*) и неусклађеност оса погонске машине и оптерећења (*misalignment*).

Посебна пажња у истраживању биће посвећена естимацији механичких параметара система применом неуралних мрежа подржаних физичким законима, са фокусом на изазове који се јављају при практичној имплементацији [25]-[28]. Пре свега, биће разматран утицај немоделоване динамике система (последица поменутих неправилности у функционисању система) на естимацију механичких параметара и начини за његово превазилажење. Биће разматрана дужина трајања естимације у зависности од хардверских могућности, као и утицај почетних услова и величине промене механичких параметара на дужину трајања естимације. На крају, биће приказана компаративна анализа измерених и неуралном мрежом предвиђених вредности брзине мотора, при чему се очекује висок степен њиховог поклапања, имајући у виду да основна архитектура *PINN*-а захтева естимацију брзине као једне од кључних величина.

Циљ ове докторске дисертације је развој и имплементација алгорита адаптивног предиктивног управљања применом неуралне мреже подржане физичким законима и интеграцијом дигиталног близанца, који омогућава:

- смањење вибрација механичког резонантног система,
- очување робусности управљаног система са променљивим механичким параметрима,
- мониторинг кризних ситуација и правовремено издавање сигурносне команде за заустављање,
- мониторинг промене механичких параметара чији се резултати користе за одржавање по стању система и праћење структурног интегритета механичких склопова [30],[31].

Литература

- [1] S. N. Vukosavic and M. R. Stojic, "Suppression of torsional oscillations in a high-performance speed servo drive," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 45, no. 1, pp. 108-117, Feb. 1998, doi: 10.1109/41.661311.
- [2] Li, Qiong & Xu, Qiang & Wu, Ren. (2016), "Low-frequency Vibration Suppression Control in a Two-mass System by Using a Torque Feed-forward and Disturbance Torque Observer," *Journal of Power Electronics*, 16(1): 249-258, doi: 10.6113/JPE.2016.16.1.249.
- [3] M. Cychowski, K. Szabat and T. Orłowska-Kowalska, "Constrained Model Predictive Control of the Drive System With Mechanical Elasticity," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 6, pp. 1963-1973, June 2009, doi: 10.1109/TIE.2009.2015753.
- [4] K. Szabat and T. Orłowska-Kowalska, "Vibration Suppression in a Two-Mass Drive System Using PI Speed Controller and Additional Feedbacks—Comparative Study," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 2, pp. 1193-1206, April 2007, doi: 10.1109/TIE.2007.892608.
- [5] S. Vukojević, L. Ristić and G. Kvaščev, "Comparison between PI and Model Predictive Control of Two Mass Resonant Mechanical System," 7th International Conference on Environment Friendly Energies and Applications (EFEA), Bagatelle Moka MU, Mauritius, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/EFEA56675.2022.10063789.

- [6] van Os, D.; Verkroost, L.; Sergeant, P.; Vansompel, H.; Stockman, K, "*Mitigation of Torsional Vibrations in a Modular Drivetrain with Interleaving Control*," *Machines* 2022, 10(6), 429. <https://doi.org/10.3390/machines10060429>
- [7] S. N. Vukosavic, "*Digital Control of Electrical Drives*", Springer New York, 2007.
- [8] S. Vukojičić, L. Ristić and G. Kvašček, "*Model Predictive Control of Two Mass Resonant Mechanical System Optimized by Neural Network*," 7th International Conference on Environment Friendly Energies and Applications (EFEA), Bagatelle Moka MU, Mauritius, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/EFEA56675.2022.10063833.
- [9] L. Wang, "*Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB*", Springer New York, 2009.
- [10] Wang X, Yan X, "*Active vibration suppression for rolling mills vibration based on extended state observer and parameter identification*," *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control* 2020; 39(2): 435-450. doi:10.1177/1461348419850370
- [11] Ju, J.; Zhao, Y.; Zhang, C.; Liu, Y, "*Vibration Suppression of a Flexible-Joint Robot Based on Parameter Identification and Fuzzy PID Control*," *Algorithms* 2018, 11, 189. <https://doi.org/10.3390/a11110189>
- [12] Jacques Farah, Hélène Chanal, Nicolas Bouton, Vincent Gagnol, "*A model-based control law for vibration reduction of serial robots with flexible joints*," *Mechanics & Industry*, 2021, 22, pp.38. [ff10.1051/meca/2021036ff.fhal-03281106f](https://doi.org/10.1051/meca/2021036ff.fhal-03281106f)
- [13] Walker, D. N., Bowler, C. E. J., Jackson, R. L., et al, "*Results of subsynchronous resonance test at Mohave*," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1975, 94(5), 1878–1889
- [14] Deri, A., Kiss, L. & Toth, G, "*A distributed parameter model for the torsional vibration analysis of turbine-generator shafts*," *Archiv f. Elektrotechnik* 70, 171–175 (1987). <https://doi.org/10.1007/BF01574066>
- [15] Zhou, F, "*Drive-train torsional vibration suppression of large scale PMSG-based WECS*," *Prot Control Mod Power Syst* 7, 37 (2022). <https://doi.org/10.1186/s41601-022-00257-8>
- [16] Sedighizadeh, M., Rezazadeh, A, "*Self tuning control of wind turbine using neural network identifier*," *Electrical Engineering* 90, 479–491 (2008). <https://doi.org/10.1007/s00202-008-0097-3>
- [17] Ravikumar, N.V.A., Saraswathi, G, "*Towards robust controller design using μ -synthesis approach for speed regulation of an uncertain wind turbine*," *Electrical Engineering* 102, 515–527 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00202-019-00891-w>
- [18] Vukojičić, S., Ristić, L. & Kvašček, G, "*Industrial application of neural network-optimized model predictive control for a two mass resonant mechanical system*," *Electrical Engineering* 107, 14121–14136 (2025). <https://doi.org/10.1007/s00202-025-03261-x>
- [19] J. Fitzgerald, C. Gomes, P. G. Larsen, "*The Engineering of Digital Twins*", Springer Cham, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-66719-0>
- [20] Martínez-Olvera, C, "*Towards the Development of a Digital Twin for a Sustainable Mass Customization 4.0 Environment: A Literature Review of Relevant Concepts*," *Automation* 2022, 3, 197-222. <https://doi.org/10.3390/automation3010010>
- [21] B. -F. Yu and J. -S. Chen, "*Optimizing Machining Time and Oscillation based on Digital Twin Model of Tool Center Point*," *IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE)*, Yunlin, Taiwan, 2020, pp. 359-362, doi: 10.1109/ECICE50847.2020.9301988.
- [22] R. H. Guerra, R. Quiza, A. Villalonga, J. Arenas and F. Castaño, "*Digital Twin-Based Optimization for Ultraprecision Motion Systems With Backlash and Friction*," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 93462-93472, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2928141.
- [23] Ludvig Björklund, Johannes Schick, Mary Ann Lundteigen, and Markus Glaser, "*Towards digital twins for safety demonstrations: Interfacing strategies for FPGA-targeted applications*," *Comput. Ind. Eng.* 186, C (Dec 2023). <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109733>
- [24] Pouya Nobahar, Chaoshui Xu, Peter Dowd, Roohollah Shirani Faradonbeh, "*Exploring digital twin systems in mining operations: A review*," *Green and Smart Mining Engineering*, Volume 1, Issue 4, 2024, Pages 474-492, ISSN 2950-5550, <https://doi.org/10.1016/j.gsme.2024.09.003>.

- [25] Charbel Mamlankou, "INVERSE PROBLEM ANALYSIS IN THE DYNAMICS OF DAMPED HARMONIC OSCILLATORS USING PINNs," 2025, hal-04949890
- [26] Yuan, L., Ni, Y.-Q., Rui, E.-Z., and Zhang, W., "Structural damage inverse detection from noisy vibration measurement with physics-informed neural networks," in Journal of Physics Conference Series, 2024, vol. 2647, no. 19, Art. no. 192013. doi:10.1088/1742-6596/2647/19/192013.
- [27] Safae Mammeri, Brais Barros, Borja Conde-Carnero, Belén Riveiro, "From traditional damage detection methods to Physics-Informed Machine Learning in bridges: A review," Engineering Structures, Volume 330, 2025, 119862, ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.119862>.
- [28] B.R. Zhao, D.K. Sun, H. Wu, C.J. Qin, Q.G. Fei, "Physics-informed neural networks for solving inverse problems in phase field models," Neural Networks, Volume 190, 2025, 107665, ISSN 0893-6080, <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2025.107665>.
- [29] Pavlenko, I., Simonovskiy, V., Ivanov, V., Zajac, J., Pitel, J., "Application of Artificial Neural Network for Identification of Bearing Stiffness Characteristics in Rotor Dynamics Analysis," In: Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4_34
- [30] Aivaliotis, P., Georgoulas, K., & Chryssolouris, G., "The use of Digital Twin for predictive maintenance in manufacturing," International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 32(11), 1067–1080. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1686173>
- [31] Zhong D, Xia Z, Zhu Y, Duan J, "Overview of predictive maintenance based on digital twin technology," Heliyon, 2023, Mar 13;9(4):e14534. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e14534. PMID: 37025897; PMCID: PMC10070392.

3. Полазне хипотезе

Полазне хипотезе докторске дисертације су:

- Применом адаптивног предиктивног управљања постиже се ефикасно пригушење осцилација код механичких резонантних система са променљивим механичким параметрима. Код класичног предиктивног управљања параметри се подешавају на основу измерених вредности механичких параметара осцилаторног система, без разматрања могућности њихових контролисаних промена. Код класичног предиктивног управљања, постизање робусности система неретко резултује смањењем перформанси, услед ограниченог познавања тачних вредности механичких параметара. Адаптивно предиктивно управљање има за циљ да се прилагоди променљивим механичким параметрима управљаног система и на тај начин обезбеди оптималне перформансе у широком опсегу њихових вредности.
- Дигитални близанац може повећати сигурност управљаног система континуалним надзором и комуникацијом са регулатором. Познавањем математичког модела резонантног механичког система и паралелним мерењем одабраних физичких величина, може се утврдити да ли се систем понаша у складу са моделованом динамиком. Ово је од посебног значаја, јер при великом одступању естимираних од мерених величина са сигурношћу је могуће закључити да је дошло до квара и да се погон мора зауставити извршавањем сигурносне команде за заустављање. Такође, уколико не дође до одступања динамике моделованог еквивалента преко одређене границе, што се утврђује на основу поређења мерене брзине и брзине естимиране помоћу математичког модела, може се закључити да систем може да настави са радом али да је дошло до промене неког од механичких параметара.
- Неуралне мреже подржане физичким законима се могу успешно користити за естимацију механичких параметара резонантног система. Познавањем математичког модела механичког осцилаторног система могуће је формирати

критеријумску функцију која би се користила при обуци неуралних мрежа подржаних физичким законима да би се постигло поклапање мерених и естимираних променљивих. Увођењем израза за природну учестаност система у коме фигуришу вредности естимираних механичких параметара у критеријумску функцију, може се превазићи проблем њене осетљивости на немоделовану динамику.

- *Мониторинг промене механичких параметара могуће је користити за предиктивно одржавање система и праћење структурног интегритета механичких склопова.* Док класичне методе мониторинга промене механичких параметара углавном захтевају инсталацију додатних уређаја који се користе за мерење вибрација, применом неуралних мрежа подржаних физичким законима може се постићи исти циљ коришћењем постојећих мерења на машини. Овај приступ поједностављује хардверске захтеве чиме пружа велику флексибилност предложеног решења.

4. Научне методе истраживања

- Развој дискретизованог у времену математичког модела резонантног механичког система за имплементацију предиктивног управљања са применом Калмановог филтера за естимацију момента торзије и брзине оптерећења, развој дигиталног близанца и неуралних мрежа подржаних физичким законима.
- Имплементација адаптивног предиктивног управљања и адаптивног Калмановог филтера за индустријске контролере.
- Развој лабораторијске поставке механичког резонантног система са вратилима различитих облика и карактеристика и променљивим моментом инерције оптерећења, као експериментална метода истраживања.
- Имплементација адаптивног предиктивног управљања у експерименталном окружењу коришћењем стандардне индустријске опреме.
- Развој алгоритма, имплементација и тестирање дигиталног близанца механичког резонантног система, који комуницира са физичким близанцем путем специјализованих интернет протокола (*Message Queuing Telemetry Transport – MQTT*).
- Развој алгоритма, имплементација и тестирање издавања сигурносне команде у кризним ситуацијама и естимација механичких параметара система заснованих на примени неуралних мрежа подржаних физичким законима у склопу дигиталног близанца.

5. Очекивани научни допринос

- Развој оригиналног концепта адаптивног предиктивног управљања резонантним механичким системима, који интегрише естимацију кључних механичких параметара система помоћу PINN-а у склопу дигиталног близанца у предиктивни модел управљања. Предложени приступ треба да омогући континуалну реконфигурацију предиктивног контролера у реалном времену, у складу са променама физичких параметара система, а на основу експерименталне верификације у условима контролисаних и репродуктивних варијација механичких параметара током рада система, пре свега момента инерције оптерећења и коефицијента крутости вратила. На овај начин би се омогућила систематска анализа утицаја параметарских промена на стабилност, робусност и динамичке перформансе управљања. Очекује се да предложени приступ омогући ефикасно пригушење резонантних осцилација и очување високих перформанси управљања у широком опсегу варијација механичких параметара, без потребе за применом конзервативних робусних подешавања и допринесе унапређењу теорије и праксе предиктивног управљања резонантним механичким системима кроз синергијску примену дигиталних близанаца и неуралних мрежа заснованих на физичким законима.

- Развој алгорита и пуштање у рад дигиталног близанца механичког резонантног система са применом комуникационе структуре на бази специјализованих интернет протокола.
- Развој алгорита неуралне мреже подржане физичким законима за веома прецизну естимацију механичких параметара механичког осцилаторног система.

6. План истраживања и структура рада

План истраживања докторске дисертације обухвата:

- У првој фази биће дефинисана математичка формулација механичког резонантног система у континуалном и дискретизованом облику са тестирањем и поређењем класичних ПИД метода регулације и предиктивног управљања.
- Друга фаза биће искључиво посвећена дефинисању адаптивног предиктивног управљања са тестирањем у симулационом окружењу.
- У трећој фази ће бити формирана *Software-in-the-Loop (SIL)* симулација адаптивног предиктивног управљања коришћењем индустријског контролера.
- Четврта фаза ће бити посвећена развоју експерименталне поставке механичког резонантног система са могућношћу промене момента инерције и варијацијом коефицијента крутости вратила.
- У петој фази ће се развијати дигитални близанац механичког резонантног система са тестирањем издавања сигурносне команде за заустављање у кризним ситуацијама. Интенција тестирања биће усмерена ка препознавању и дефинисању услова под којим се издаје команда за заустављање у кризним ситуацијама. Ово обухвата процес доношења одлука, као и релевантне факторе које је потребно узети у обзир.
- Шеста, уједно и најкомплекснија фаза биће посвећена дизајну и пуштању у рад неуралне мреже подржане физичким законима за тачну естимацију механичких параметара механичког осцилаторног система. Ова фаза ће укључити и тестирање рада неуралне мреже са више различитих вратила довољно велике разлике коефицијената крутости, као и са различитим вредностима момената инерције оптерећења да би се дефинисао радни опсег за прецизну естимацију механичких параметара коришћењем *PINN*-а.
- Последња, седма фаза ће садржати тестирање адаптивног предиктивног управљања унапређеног интеграцијом дигиталног близанца заснованог на примени неуралне мреже подржане физичким законима, где ће се верификовати предложене теоријске и практичне методе.

На основу истраживања спроведеног у оквиру предложене методологије, у дисертацији ће бити анализирани приступи за правовремено генерисање сигурносних команди у кризним режимима рада електромоторних погона, са циљем повећања безбедности и поузданости рада применом концепта дигиталног близанца. Биће разматран утицај промена механичких параметара и неправилности у раду система, као што су непричвршћеност конструкције (*looseness*) и неусклађеност оса (*misalignment*), као и могућности естимације механичких параметара применом неуралних мрежа подржаних физичким законима (*PINN*). Посебна пажња биће посвећена утицају немоделоване динамике, почетних услова и хардверских ограничења на тачност и трајање естимације, уз компаративну анализу измерених и предвиђених вредности брзине мотора, чиме се тежи развоју поузданог и робусног приступа за рану детекцију неправилности и унапређење перформанси и сигурности рада система.

Значај ове докторске тезе се огледа у практичној применљивости добијених резултата у савременим индустријским процесима, као и у подршци развоју концепта четврте индустријске револуције (*Industry 4.0*) [20]. Унапређење перформанси предиктивног управљања у широком опсегу промена механичких параметара позитивно утиче на робусност система, као и на проширење могућности примене у индустријским апликацијама.

Употреба *PINN-a* за подршку напредним управљачким структурама је тек у зачетку, а њена реална експанзија се очекује у наредном периоду. Такође, унапређењем управљачких могућности предиктивног управљања повећава се квалитет финалног производа и смањује шкарт у индустријским постројењима. Значајан допринос ове докторске тезе представља и реализација експерименталне поставке у Лабораторији за електромоторне погоне на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, која омогућава експерименталну верификацију изнетих тврдњи и представља неопходну основу за даља истраживања у овој области.

7. Закључак и предлог

На основу приложене документације, усмене одбране теме докторске дисертације, као и непосредног увида у досадашњи рад кандидата Слободана Вукојичића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, Комисија закључује следеће:

1. Кандидат испуњава све формалне и суштинске услове прописане Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Београду и Статутом Електротехничког факултета у Београду за израду докторске дисертације.
2. Предложена тема „Адаптивно предиктивно управљање резонантним механичким системима применом концепта дигиталних близанаца”, односно на енглеском „Adaptive Predictive Control of Resonant Mechanical Systems based on Digital Twin Concepts”, је научно заснована, а резултати теме ће представљати значајан и оригиналан допринос. Тема припада ужој научној области „Енергетски претварачи и погони”.

На основу претходно изложеног, Комисија предлаже Научно наставном већу Електротехничког факултета у Београду да кандидату Слободану Вукојичићу одобри израду докторске дисертације која ће бити написана на српском језику, а под називом „Адаптивно предиктивно управљање резонантним механичким системима применом концепта дигиталних близанаца”, односно на енглеском језику „Adaptive Predictive Control of Resonant Mechanical Systems based on Digital Twin Concepts”, под менторством др Лепосаве Ристић, ванредног професора.

У Београду, 26. 2. 2026. год.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Милан Бебић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Веран Васић, редовни професор
Универзитет у Новом Саду – Факултет техничких наука



др Горан Квапчев, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет