

**ФАКУЛТЕТ ЗА МАШИНСТВО И ГРАЂЕВИНАРСТВО У КРАЉЕВУ**  
**УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ**

Факултет за машинство и грађевинарство  
у Краљеву  
Универзитета у Крагујевцу,  
Број: 88  
Датум: 14.02. 2022 .год.  
Краљево, Доситејева 19.

**НАСТАВНО - НАУЧНОМ ВЕЋУ**  
**ФАКУЛТЕТА ЗА МАШИНСТВО И ГРАЂЕВИНАРСТВО У КРАЉЕВУ**  
**И**  
**ВЕЋУ ЗА ТЕХНИЧКО - ТЕХНОЛОШКЕ НАУКЕ**  
**УНИВЕРЗИТЕТА У КРАГУЈЕВЦУ**

**Предмет:** Извештај Комисије за оцену научне заснованости теме и испуњености услова кандидата Владимира Ђорђевића, дипл. инж. маш. и предложеног ментора доц. др Владимира Стојановића за израду докторске дисертације.

Одлукама Наставно-научног већа Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву, број. 1085/1 од 22.12.2021. год. и Већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу, број: IV-04-7/16 од 19.01.2022. год., именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме и испуњености услова кандидата Владимира Ђорђевића, дипл. инж. маш. и предложеног ментора доц. др Владимира Стојановића за израду докторске дисертације под називом:

**“ИНТЕЛИГЕНТНИ РЕГУЛАТОРИ ЗАСНОВАНИ НА АДАПТИВНОМ ДИНАМИЧКОМ ПРОГРАМИРАЊУ”**

На основу увида у приложену документацију и личног познавања кандидата, Комисија подноси Наставно - научном већу следећи:

**ИЗВЕШТАЈ**

**1. Научни приступ проблему предложеног нацрта докторске дисертације и процена научног доприноса крајњег исхода рада**

У предложеном нацрту докторске дисертације, кроз одличну теоријску основу и научни приступ проблему, кандидат је образложио предмет истраживања, наводећи актуелност и значај истраживања у области пројектовања интелигентних регулатора. Кандидат је предложио план истраживања у наведеној области, у складу са савременим научним методама заснованих на адаптивном динамичком програмирању (АДП).

Проблем који је предмет истраживања предложеног нацрта докторске дисертације један је од водећих изазова научне заједнице која се бави аутоматским управљањем. У савременој теорији управљања, оптимално управљање игра веома битну улогу у пројектовању регулатора. Наиме, главни изазов је пројектовање оптималних алгоритама управљања који ће обезбедити минималну потрошњу енергије<sup>1,2</sup>. Међутим, оптимално управљање

<sup>1</sup> D. Bertsekas, Reinforcement Learning and Optimal Control, Athena Scientific, 2019.

<sup>2</sup> D. Bertsekas, Dynamic Programming and Optimal Control, 4th ed, Athena Scientific, 2012

представља технику управљања, која обично зависи од савршеног познавања модела система, који није могуће добити у већини практичних случајева. Чак и ако се може добити апроксимирани модел система, динамичка неодређеност, проузрокована неслагањем апроксимације и реалног система, ће деградирати перформансе управљања традиционално пројектованог оптималног регулатора<sup>3,4</sup>. Стога су даља истраживања пројектовања оптималних регулатора веома важна и примарни циљ ове дисертације.

Адаптивно динамичко програмирање (АДП) представља ефикасан начин за постизање високих перформанси оптималног регулатора који се заснива на адаптивном управљању, оптималном управљању и учењу са поткрепљивањем (reinforcement learning)<sup>5,6,7,8</sup>. Последњих година је поље примене АДП-а веома распрострањено у различитим областима истраживања укључујући роботске системе, ваздухопловне системе, навођене ракете, свемирске летелице, итд.<sup>9,10,11</sup>.

Класични алгоритми управљања засновани на АДП-у имају повратну спрегу по стању. Међутим, директно мерење вектора стања није изводљиво у практичним имплементацијама и осим тога захтевало би веома скупу мерну опрему. Зато је погодније користити алгоритме управљања који примењују методе засноване на реконструкцији стања, а не на њиховом директном мерењу. АДП представља технику управљања засновану на мерењима (data-driven) која може гарантовати стабилност затвореног система управљања. Наиме, у условима непознате динамике система и немерљивих стања, од великог интереса је коришћење техника управљања заснованих на измереним улазно/излазним сигнаlima, које се још називају и технике са излазном повратном спрегом (output feedback). Главна корист ових техника управљања је да за њихову примену није потребно познавање динамике система. За непознат модел система, ова индиректна техника генерише низ субоптималних регулатора који конвергирају ка оптималном управљању са повећањем броја итерација.

Надаље, да би се обезбедила конзистентност апроксимација и добила јединствена решења у сваком кораку итерације, потребно је додати неки истраживачки шум (exploration noise) управљачком улазу, да би се испунили захтеви перзистентне побуде. За истраживачки шум обично се примењује нека перзистентна побуда, као што је бели шум или поворка псеудо случајних бинарних сигнала (PRBS)<sup>12,13,14</sup>. Избор истраживачког шума је у општем смислу

<sup>3</sup> F.L. Lewis and D. Liu, Reinforcement learning and approximate dynamic programming for feedback control. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2012.

<sup>4</sup> F.L. Lewis and V.I. Syrmos, Optimal control. Hoboken, NJ, USA: Wiley; 1995.

<sup>5</sup> J.J. Murray, C.J. Cox, G.G. Lendaris et al. Adaptive dynamic programming, IEEE Trans. Syst. Man Cybern. C, Appl. Rev., 2002; 32, (2): 140–153.

<sup>6</sup> P.J. Werbos, Beyond regression: New tools for prediction and analysis in the behavioural science. Ph. D. thesis. Harvard University; 1974.

<sup>7</sup> W. Gao and Z.-P. Jiang, Learning-based adaptive optimal tracking control of strict-feedback nonlinear systems, IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst., 2018, 29, (6): 2614–2624.

<sup>8</sup> B. Tao, Z.-P. Jiang, Value iteration and adaptive dynamic programming for data-driven adaptive optimal control design. Automatica. 2016; 71:348-360.

<sup>9</sup> M. Roozegar, M.J. Mahjoob and M. Jahromi, Optimal motion planning and control of a nonholonomic spherical robot using dynamic programming approach: simulation and experimental results. Mechatronics. 2016; 39: 174-184.

<sup>10</sup> J.L. Sun and C.S. Liu, An Overview on the Adaptive Dynamic Programming Based Missile Guidance Law. Acta Automatica Sinica. 2017; 43(7): 1101-1113.

<sup>11</sup> Q. Hu, Robust adaptive sliding mode attitude maneuvering and vibration damping of three-axis-stabilized flexible spacecraft with actuator saturation limits. Nonlinear Dynamics, 2008; 55(4):301-321.

<sup>12</sup> L. Ljung, System Identification: Theory for the User, 2nd ed., 1999, Prentice – Hall, NJ.

<sup>13</sup> R. Pintelon, J. Schoukens, System Identification: A Frequency Domain Approach. IEEE Press, NY, 2001

<sup>14</sup> C.R. Rojas, J.C. Agüero, J.S. Welsh, G.C. Goodwin, A. Ferrier: Robustness in experiment design. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012; 57(4): 860-874.

нетривијалан задатак за већину алгоритама управљања заснованих на учењу<sup>15</sup> и биће један од исхода тезе.

Спровођење алгоритама АДП-а обично се заснива на периодичном одабирању<sup>16</sup>. У циљу чувања ограничених комуникационих и рачунских ресурса, онедавно су почеле да се примењују стратегије покренуте догађајима (event-triggered) у алгоритмима управљања који су засновани на АДП-у<sup>17,18,19,20</sup>. Штавише, број ажурирања управљачких улаза на овај начин ће бити смањен у односу на периодично ажурирање регулатора, јер се ажурира само када је то неопходно (нпр. када се погоршају перформансе система). Спровођење алгоритама покренутих догађајима се заснива на аperiodичном одабирању. У литератури је предложено неколико регулатора заснованих на догађајима, од којих су већина регулатори са повратном спрегом по стању<sup>21,22,23,24,25</sup>. За разлику од тога, у овој тези ће бити разматран проблем управљања заснованог на АДП-у покренутог догађајима у случају када је доступна само повратна информација о излазу.

Због све већих захтева за безбедношћу и стабилношћу у савременом индустријском применама, проблем детекције отказа динамичких система је веома актуелан последњих година<sup>26,27,28,29,30</sup>. У постојећој литератури детекција отказа и дијагностика система заснованих на моделу (model-based) су веома заступљене<sup>31,32,33,34</sup>. Са друге стране, могућности

---

<sup>15</sup> A. Al-Tamimi, F.L. Lewis and M. Abu-Khalaf, Model-free Q-learning designs for linear discrete-time zero-sum games with application to H-infinity control, *Automatica*, 2007; 43(3): 473–481.

<sup>16</sup> W.N. Gao, Y. Jiang, Z.-P. Jiang and T.Y. Chai, Output feedback adaptive optimal control of interconnected systems based on robust adaptive dynamic programming. *Automatica*, 2016; 72: 37–45.

<sup>17</sup> K.J. Åström, Event-based control, *Analysis and Design of Nonlinear Control Systems*. Berlin, Germany: Springer, 2008, pp. 127–147.

<sup>18</sup> W.P.M.H. Heemels, M.C.F. Donkers, and A.R. Teel, Periodic event-triggered control for linear systems, *IEEE Trans. Autom. Control*, 2013; 58(4): 847–861.

<sup>19</sup> B. Jiang, H.R. Karimi, Y. Kao, and C. Gao, Takagi–Sugeno model based event-triggered fuzzy sliding-mode control of networked control systems with semi-Markovian switchings, *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, 2020; 28(4): 673–683.

<sup>20</sup> T. Liu and Z.-P. Jiang, A small-gain approach to robust event-triggered control of nonlinear systems, *IEEE Trans. Autom. Control*, 2015; 60(8): 2072–2085.

<sup>21</sup> P. Tabuada, Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks, *IEEE Trans. Autom. Control*, 2007; 52(9):1680–1685.

<sup>22</sup> M. Lemmon, Event-triggered feedback in control, estimation, and optimization, in *Networked Control Systems*, vol. 405. London, U.K.: Springer, 2010, pp. 293–358.

<sup>23</sup> J. Lunze and D. Lehmann, A state-feedback approach to event-based control, *Automatica*, 2010; 46(1): 211–215.

<sup>24</sup> M. Mazo, A. Anta, and P. Tabuada, An ISS self-triggered implementation of linear controllers, *Automatica*, 2010; 46(8):1310–1314.

<sup>25</sup> A. Sahoo, H. Xu, and S. Jagannathan, Neural network-based event-triggered state feedback control of nonlinear continuous-time systems, *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.*, 2016; 27(3):497–509.

<sup>26</sup> S. Lu, Q. He and J. Wang, A review of stochastic resonance in rotating machine fault detection, *Mech. Syst. Sig. Process.*, 2019; 116:230–260.

<sup>27</sup> Y. Li, M. Zuo, J. Lin and J. Liu, Fault detection method for railway wheel flat using an adaptive multiscale morphological filter, *Mech. Syst. Sig. Process.*, 2017; 84, 642–658.

<sup>28</sup> T. Popescu and D. Aiordachioaie, Fault detection of rolling element bearings using optimal segmentation of vibrating signals, *Mech. Syst. Sig. Process.* 2019; 116: 370–391.

<sup>29</sup> L. Li, M. Chadli, S. Ding, J. Qiu and Y. Yang, Diagnostic observer design for t-s fuzzy systems: Application to real-time-weighted fault-detection approach, *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 2017; 26(2):805–816.

<sup>30</sup> A. Chibani, M. Chadli, P. Shi and N. Braiek, Fuzzy fault detection filter design for T-S fuzzy systems in the finite-frequency domain, *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 2016; 25(5):1051–1061.

<sup>31</sup> S. Cho, Z. Gao and T. Moan, Model-based fault detection, fault isolation and fault-tolerant control of a blade pitch system in floating wind turbines, *Renewable Energy*, 2018; 120: 306–321.

интелигентних регулатора заснованих на АДП-у, због предности које пружају методе засноване на учењу у реалном времену (online learning methods), представљају добру основу за унапређење детекције и дијагностике отказа у системима аутоматског управљања, односно побољшање перформанси система управљања толерантних на отказе (fault tolerant control), што је такође један од циљева предложеног нацрта тезе.

Практична применљивост алгоритама управљања заснована на АДП-у је побољшана чињеницом да се нелинеарни системи могу веома прецизно представити линеарним моделима са естимацијом динамике у реалном времену<sup>35,36</sup>. Притом, многе савремене инжењерске апликације као што су аутономна возила<sup>37,38</sup>, микромреже<sup>39</sup>, високо осетљиви микрофони<sup>40</sup>, предвиђање напрезања код замора материјала<sup>41</sup>, одржавање безбедности сајбер-физичких система<sup>42</sup>, управљање робота<sup>43</sup>, захтевају пројектовање регулатора у реалном времену, заснованих на линеарним моделима. Пројектовани регулатори ће бити способни да управљају линеарним и нелинеарним системима са потпуно непознатим матрицама система, а експоненцијална конвергенција се постиже док је услов перзистентне побуде задовољен.

Поред теоријских оквира, практични аспект добијених резултата биће илустрован интензивним симулацијама. Такође, конкретна примена предложене методологије биће приказана за проблем управљања хидрауличког серво актуатора (ХСА), који се често користе у индустрији у задацима који захтевају велике снаге, високу тачност и динамичко кретање. Добро је познато да је ХСА веома сложен нелинеарни систем, и да се параметри система не могу тачно одредити због различитих неодређености, немогућности мерења неких параметара и поремећаја. У овој дисертацији се разматра проблем управљања ХСА са непознатом динамиком. У последње две деценије, пројектовање регулатора високих перформанси ХСА привлачи све већу пажњу због интензивног повећања перформанси техничких система у индустрији<sup>44,45,46,47</sup>. Велики број хидрауличких машина, често ради са

---

<sup>32</sup> J. Lan and R.J. Patton, *Robust Integration of Model-Based Fault Estimation and Fault-Tolerant Control*, Springer Nature, Switzerland, 2021.

<sup>33</sup> R. Isermann, *Fault-Diagnosis Applications. Model-Based Condition Monitoring: Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault-tolerant Systems*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2011.

<sup>34</sup> S.X. Ding, *Model-Based Fault Diagnosis Techniques: Design Schemes, Algorithms and Tools*, 2nd ed., Springer-Verlag, London, 2013.

<sup>35</sup> M.T. Rodriguez and S.P. Banks, *Linear, Time-Varying Approximations to Nonlinear Dynamical Systems*. Berlin: Springer; 2010.

<sup>36</sup> V. Stojanovic and D. Prsic, Robust identification for fault detection in presence of non-Gaussian noises: application to hydraulic servo drives. *Nonlinear Dynamics*. 2020; 100(3):2299-2313.

<sup>37</sup> M. Mynuddin and W. Gao, Distributed Predictive Cruise Control Based on Reinforcement Learning and Validation on Microscopic Traffic Simulation. *IET Intelligent Transportation Systems*. 2020; 14(5): 270-277.

<sup>38</sup> M. Mynuddin, W. Gao and Z.-P. Jiang, Reinforcement Learning for Multi-Agent Systems with an Application to Distributed Predictive Cruise Control. *American Control Conference*, 2020.

<sup>39</sup> M. Davari, W. Gao, Z.-P. Jiang and F.L. Lewis, An Adaptive Optimal Control Approach to the Primary Frequency Control of Islanded Modernized Microgrids Using Engine-Generators. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2021; 18(3): 1109-1121.

<sup>40</sup> A. Walle, F. Naets and W. Desmet, Virtual microphone sensing through vibro-acoustic modelling and Kalman filtering. *Mech. Syst. Signal Process*. 2018; 104: 120-133.

<sup>41</sup> K. Maes, A. Iliopoulos, W. Weijtjens, C. Devriendt and G. Lombaert, Dynamic strain estimation for fatigue assessment of an offshore monopile wind turbine using filtering and modal expansion algorithms. *Mech. Syst. Signal Process*. 2016; 76-77:592-611.

<sup>42</sup> Y.H. Chang, Q. Hu and C.J. Tomlin, Secure estimation based Kalman filter for cyber-physical systems against sensor attacks. *Automatica*. 2018; 95:399-412.

<sup>43</sup> A. Cavallo, G. De Maria, C. Natale and S. Pirozzi, Slipping detection and avoidance based on Kalman filter. *Mechatronics*. 2014; 24(5): 489-499.

<sup>44</sup> A. Vacca and G. Franzoni: *Hydraulic Fluid Power: Fundamentals, Applications, and Circuit Design*, Wiley, 2021.

<sup>45</sup> N. Manring, *Fluid Power Pumps and Motors: Analysis, Design and Control*, McGraw-Hill Education, 2013

великим оптерећењима у тешким условима рада. Као резултат утицаја спољашње температуре, прашине, влажности, хабања, различитих оптерећења и поремећаја, ХСА је обично подвргнут великим неодређеностима током рада. Дакле, управљање ХСА са високом тачношћу увек је представљало велики изазов за истраживаче због немоделоване динамике, великих нелинеарности, параметарске неодређености, немерљивих стања у реалним условима рада, итд. Познат је проблем немогућности одређивања већине физичких параметара компоненти ХСА. Док су неки параметри доступни само са одређеном тачношћу, остали параметри су потпуно непознати. Ове чињенице представљају непремостиве проблеме у постизању управљања ХСА високе тачности, које се не може постићи без познавања тачног ХСА модела<sup>48,49,50,51</sup>. Стога је развој интелигентних регулатора заснованих на АДП-у један од примарних задатака у циљу постизања високе тачности ХСА.

У нацрту докторске дисертације кандидат је јасно описао проблематику и представио концепт истраживања. Анализирајући постојећу литературу, уочене су могућности унапређења постојећих алгоритама заснованих на АДП-у, односно, могућности адаптације и развоја за проблеме управљачких алгоритама покренутих догађајима и алгоритама управљања у присуству толерисаних отказа.

Предложени научни приступ се темељи на постављању полазних хипотеза, јасно дефинисаној методологији и начину на основу којих ће се резултати валидирати. Имајући у виду приказ проблема истраживања, полазне хипотезе и предложене научне методе истраживања, приказани нацрт докторске дисертације садржи све елементе који су потребни да би се израдом докторске дисертације дао научни допринос значајан за даљи развој научних истраживања у области пројектовања интелигентних регулатора.

#### **Веза са досадашњим истраживањима**

Увидом у објављене радове у часописима међународног и националног значаја, као и радове представљене на међународним и националним конференцијама, може се закључити да се кандидат Владимир Ђорђевић у свом досадашњем научноистраживачком раду примарно бавио применом метода вештачке интелигенције у области аутоматског управљања као и проблемима који се односе на пројектовање регулатора. Такође, вишегодишње учешће на националним научноистраживачким пројектима представља добру основу за реализацију ове дисертације.

Рад у оквиру ове дисертације омогућава кандидату да оствари континуитет у свом научноистраживачком раду, што поред стручног усавршавања кандидата има за циљ и унапређење постојећих и развој нових метода које се односе на пројектовање интелигентних регулатора.

---

<sup>46</sup> N. Nedic, V. Stojanovic and V. Djordjevic, Optimal control of hydraulically driven parallel robot platform based on firefly algorithm. *Nonlinear Dynamics*. 2015; 82(3):1457–1473.

<sup>47</sup> J.J. Vyas, B. Gopalsamy and H. Joshi, *Electro-Hydraulic Actuation Systems: Design, Testing, Identification and Validation*, Springer, Singapore, 2019.

<sup>48</sup> V. Stojanovic, N. Nedic, D. Prsic, Lj. Dubonjic and V. Djordjevic, Application of cuckoo search algorithm to constrained control problem of a parallel robot platform. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016; 87(9-12): 2497-2507.

<sup>49</sup> V. Filipovic, N. Nedic and V. Stojanovic, Robust identification of pneumatic servo actuators in the real situations. *Forschung im Ingenieurwesen - Engineering Research*. 2011; 75(4):183-196.

<sup>50</sup> J.F. Blackburn, G. Reethof and J.L. Shearer, *Fluid Power Control*, Massachusetts: The MIT Press Cambridge; 1960.

<sup>51</sup> M. Jelali and A. Kroll, *Hydraulic Servo-systems: Modelling, Identification and Control*. Berlin: Springer; 2003.

## 2. Образложење предмета, метода и циља, који уверљиво упућују да је предложена тема од значаја за развој науке

### Предмет, циљеви и хипотезе

У нацрту тезе се разматра управљање засновано на учењу у реалном времену (online learning), где током рада система, из измерених улаза и излаза, регулатор учи да компензује непознату динамику система, различите поремећаје и грешке моделовања обезбеђујући жељене перформансе система управљања. Оптимални закон управљања се итеративно остварује на основу излазне повратне спреге, реконструкције стања и АДП-а. Непознати модел система се прво идентификује након чега се алгебарска Рикатијева једначина итеративно решава. Да би се обезбедила конзистентност апроксимација и добила јединствена решења у сваком кораку итерације, улазу се додаје истраживачки шум у виду суме синусоида. Тако добијени улазни и излазни сигнали се користе за реконструкцију вектора стања модела, што има велики практични значај у односу на технике управљања са директним мерењем стања које захтевају употребу великог броја сензора. Коришћењем излазне повратне спреге и методе реконструкције стања, примењена техника управљања заснована на АДП-у представља користан алат за дигиталну имплементацију у реалним системима. Закон управљања се итеративно учи и у реалном времену веома ефикасно обезбеђује решења проблема оптималног управљања заснованог само на мерењима.

Применом управљачке стратегије засноване на догађајима, број ажурирања управљачких улаза ће бити смањен у односу на периодично ажурирање регулатора, јер се регулатор ажурира само када се испуне одређени услови (нпр. када се погоршавају перформансе система). На тај начин ће се значајно очувати енергетски, рачунски и комуникациони ресурси.

Могућности интелигентних регулатора заснованих АДП-у, због предности које пружају методе засноване на учењу у реалном времену (online learning methods), представљају добру основу за унапређење детекције и дијагностике отказа у системима аутоматског управљања заснованих на моделу (model based), односно побољшање перформанси система управљања толерантног на отказе (fault tolerant control).

Доминантне нелинеарности у ХСА, са којима је веома тешко руковати са великом тачношћу, су немогућност тачног одређивања параметара настале као резултат заштите власничких података појединих произвођача, индиректног мерења, губицима притиска, различитим условима струјања, коефицијентима трења и цурења, генерисањем дисконтинуалних управљачких сигнала услед ефеката засићења и промене смера серво вентила, итд. Штавише, променљиви услови рада током извршавања задатака, као што су температура уља, коефицијент стишљивости, флукутирајући напојни притисак и запремина у цеви, довешће до промена параметара модела које погоршавају постојеће перформансе управљања. Основна предност предложене методологије управљања је избегавање познавања динамике система, што је веома важно у практичним условима.

Дакле, ова теза има за циљ да унапреди постојеће алгоритме управљања засноване на АДП-у, развије одговарајуће АДП регулаторе покренуте догађајима и адаптира их за имплементацију у системе управљања толерантних на отказе. Валидност и ефективност предложеног приступа управљања биће евалуирани кроз интензивне симулације.

### Методе

Методолошки приступ у оквиру ове дисертације је конципиран на основу досадашњих истраживања и интеграцијом више анализираних методологија доступних у литератури уз обавезне модификације. Предложена тема је веома актуелна и представља допринос развоју интелигентних регулатора у циљу повећања перформанси система управљања добијених

применом научних метода анализе, апстракције, специјализације, синтезе, конкретизације, генерализације, моделовања, доказивања, компарације и експеримента.

У првој фази истраживања кандидат ће извршити преглед литературе из области пројектовања интелигентних регулатора са посебним освртом на управљање у присуству немоделоване динамике. У том контексту ће посебна пажња бити посвећена анализи и поређењу ефикасности различитих приступа. Овај сегмент истраживања се доминантно ослања на научне методе анализе и апстракције. Улазећи дубље у област истраживања, кандидат ће на критичан начин навести ограничења и недостатке постојећих приступа. Овај сегмент истраживања се доминантно ослања на научне методе анализе, специјализације и конкретизације. У следећој фази истраживања кандидат ће се посветити поправкама и решењима уочених проблема и у основи користити методе и технике машинског учења, па је неопходно прикупити довољну количину улазних и излазних података потребних за фазу учења. У ту сврху, применом метода планирања експеримента, пројектује се побуди сигнал који максимизира количину информације из мерења која су на располагању, будући да је прави систем априорно непознат. За реализацију ових корака кандидат ће доминантно користити методе синтезе, конкретизације и експеримента. На основу прикупљених мерења, применом адаптивног динамичког програмирања итеративно се одређује оптимално појачање интелигентног регулатора. Притом се због потешкоћа директног израчунавања алгебарске Рикатијеве једначине користе ефикасни алгоритми нумеричких апроксимација. У реализацији ових корака примењене су научне методе синтезе, конкретизације и компарације. Конвергенција разматраних алгоритама ће се доказати у форми теорема, што имплицира примену научне методе доказивања. Предложена методологија биће проширена на континуалне нелинеарне системе, управљање засновано на догађајима и управљање са толерисаним отказима, при чему се користе научне методе синтезе, конкретизације и генерализације. Ажурирање појачања регулатора се реализује апериодично сагласно пројектованом услову укључивања. Сва предложена истраживања биће реализована и верификована кроз интензивне симулације у софтверском пакету Матлаб. У реализацији ових корака примењене су научне методе синтезе, генерализације, моделовања, компарације и експеримента.

### **Оквирни садржај докторске дисертације**

Планирано је докторска дисертација буде реализована кроз следећа поглавља:

1. Увод
2. Регулатори засновани на АДП-у
3. Управљање засновано на догађајима
4. Системи управљања са толерисаним отказима
5. Резултати симулација
6. Закључна разматрања
7. Литература

### **3. Образложење теме за израду докторске дисертације које омогућава закључак да је у питању оригинална идеја или оригиналан начин анализирања проблема**

На основу представљеног концепта и наведене литературе може се закључити да постоји велико интересовање и потреба за развој интелигентних система управљања у присуству немоделоване динамике и различитих поремећаја.

У нацрту докторске дисертације “Интелигентни регулатори засновани на адаптивном динамичком програмирању” предвиђено је побољшање постојећих регулатора, а главни научни доприноси који се очекују огледају се у следећем:

- Биће извршен врло детаљан преглед научне области која се бави пројектовањем интелигентних регулатора заснованих на адаптивном динамичком програмирању, на критичан начин наведена ограничења и недостаци појединих приступа и на тај начин ће се отворити простор за развој новог приступа који је тема ове дисертације.
- Биће развијена АДП метода за дискретне линеарне системе са комплетно непознатом динамиком.
- Применом теорије планирања експеримента, у тези ће се користити сума синусоида као оптимални сигнал који ће омогућити да излаз система носи максимум информације о систему, што ће скратити време учења, односно убрзати процес пројектовања регулатора.
- Користећи чињеницу да се нелинеарни системи могу верно представити сумом линеарних система, предложена методологија биће проширена на континуалне нелинеарне системе.
- Биће имплементирана стратегија управљања заснована на догађајима да би се смањио број укључивања регулатора, а тиме уштедели енергетски, рачунски и комуникациони ресурси.
- Имплементирана стратегија управљања унапредиће детекцију и дијагностику отказа, и побољшати перформансе система управљања у случају појаве отказа.
- Евалуација предложене методологије биће остварена кроз интензивне симулације.
- Практична примењивост предложених регулатора биће верификована на инжењерским проблемима као што је управљање хидрауличког серво актуатора.

Комисија закључује да је предложена тема докторске дисертације, са образложеним предметом и циљевима рада, научним доприносима и очекиваним резултатима, насталим детаљном анализом доступних научних радова у научном и стручном смислу оригинална идеја.

#### **4. Усклађеност дефиниције предмета истраживања, основних појмова, предложене хипотезе, извора података, метода анализе са критеријумима науке и поштовања научних принципа у изради коначне верзије докторске дисертације**

Кандидат Владимир Ђорђевић ће у својој докторској дисертацији обухватити све елементе савременог научноистраживачког рада поштујући основне критеријуме науке, научних циљева и метода анализе, имплементацијом постојећих и развјањем оригиналних идеја научног истраживања.

У достављеној пријави теме, кандидат се служио одговарајућом терминологијом из области која је предмет рада. Дефиниција предмета истраживања је усклађена са основним појмовима, предложеним хипотезама и методама истраживања. Кандидат је показао изразиту способност за селекцију и анализу литературних извора.

С обзиром на то да су циљеви истраживања проситекли из запажених недостатака и недовољне истражености проблема, добијени резултати представљали би оригинални допринос кандидата истраживачкој области.

## 5. Преглед научноистраживачког рада кандидата

### Кратка биографија кандидата

Владимир Ђорђевић је рођен 18.02.1985. године у Крушевцу. Основну и средњу школу је завршио у родном граду. Средње образовање је стекао у периоду 1999.-2003. год. у Машинско-електротехничкој школи у Крушевцу – образовни профил машински техничар.

Након завршетка средње школе уписао је Машински факултет у Краљеву. Дипломирао је на смеру Конструисање и пројектовање у машиноградњи, група Аутоматско управљање и флуидна техника на тему Фази управљање инверзним клатном, 2010. године. Током студија остварио је просечну оцену 8,83 (осам и 83/100). Докторске академске студије на Факултету за машинство и грађевинарство у Краљеву уписао је школске године 2019/2020, и тренутно је студент треће године докторских студија. Положио је све испите предвиђене програмом студија са просечном оценом 9,4 (девет и 40/100).

Од јануара 2011. године је запослен на Факултету за машинство и грађевинарство у Краљеву, и био је укључен у реализацију пројекта код Министарства за науку:

1. ТР33026, финансиран од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја, 2011-2019, Повећање енергетске ефикасности постројења за производњу топлотне енергије помоћу аутоматског управљања. Руководилац пројекта проф. др Драган Пршић. Носилац истраживања Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву.
2. ТР33027, финансиран од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја, 2011-2019, Развој енергетске ефикасности постројења за гасификацију и когенерацију чврсте биомасе. Руководилац пројекта проф. др Раде Карамарковић. Носилац истраживања Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву.

Од јануара 2019. године изабран је у звање асистента за ужу научну област Аутоматско управљање и флуидна техника и ангажован на извођењу вежби предмета Катедре за аутоматско управљање и флуидна техника.

### Научноистраживачки рад

Као аутор и коаутор кандидат је објавио радове у међународним часописима и на међународним скуповима.

#### ➤ Радови на SCI листи:

1. Vladimir Stojanovic, Novak Nedic, Dragan Prsic, Ljubisa Dubonjic, **Vladimir Djordjevic** (2016): Application of cuckoo search algorithm to constrained control problem of a parallel robot platform, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 87 (9), pp. 2497-2507, DOI: 10.1007/s00170-016-8627-z, ISSN: 0268-3768, (IF: 2.209) (M22)
2. Novak Nedic, Vladimir Stojanovic, **Vladimir Djordjevic** (2015): Optimal control of hydraulically driven parallel robot platform based on firefly algorithm, Nonlinear Dynamics, Vol. 82 (3), pp. 1457-1473, DOI: 10.1007/s11071-015-2252-5, ISSN: 0924-090X, (IF: 3.000) (M21)
3. Novak Nedić, Dragan Prsic, Ljubisa Dubonjic, Vladimir Stojanovic, **Vladimir Djordjevic** (2014): Optimal cascade hydraulic control for a parallel robot platform by PSO, The International Journal of

Advanced Manufacturing Technology, Vol. 72, pp. 1085-1098, DOI: 10.1007/s00170-014-5735-5, ISSN: 0268-3768, (IF: 1.779) (M21)

4. Radovan R. Bulatović, Stevan R. Đorđević, **Vladimir S. Đorđević** (2013): Cuckoo Search algorithm: A metaheuristic approach to solving the problem of optimum synthesis of a six-bar double dwell linkage, Mechanism and Machine Theory 61, pp. 1-13, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2012.10.010, ISSN 0094-114X, (IF: 1.310) (M21)
5. Ljubiša M. Dubonjić, Vojislav Ž. Filipović, Novak N. Nedić, **Vladimir Đorđević** (2018): Design of an  $H^\infty$  PI controller with given relative stability and its application to the CSTR problem, Hemijska Industrija 72 (3), pp. 115-127, DOI: 10.2298/HEMIND170529007D, ISSN 0367-598X, (IF: 0.591) (M23)

➤ **Радови у међународним часописима:**

1. Vojislav Filipović, **Vladimir Đorđević** (2015): Design of robust recursive identification algorithms for large-scale stochastic systems, FACTA UNIVERSITATIS Automatic Control and Robotics, Vol. 14 (1), pp. 43-54, ISSN: 1820-6417, (M24)

➤ **Међународне конференције:**

1. **V. Đorđević**, M. Morato, V. Stojanović, Adaptive Dynamic Programming Based Optimal Control for Hydraulic Servo Actuator, X International Triennial Conference Heavy Machinery HM 2021, June 23 – June 25 2021, Vrnjačka Banja (Serbia), Session C, pp. 37-42, ISBN: 978-86-81412-09-1
2. D. Pršić, V. Stojanović, **V. Đorđević**, A Constructive Approach to Teaching with Robotics, 7th International Scientific Conference Technics and Informatics in Education, 25-27 May 2018, Čačak (Serbia), pp. 273-278, ISBN: 978-86-7776-226-1
3. V. Filipović, **V. Đorđević**, Identification of MIMO Hammerstein Models in the Presence of Piecewise Polynomial Disturbances using Kaczmarz Algorithm, IX International Triennial Conference Heavy Machinery HM 2017, June 28 – July 1 2017, Zlatibor (Serbia), Session C, pp. 19-24, ISBN: 978-86-82631-89-7
4. **V. Đorđević**, V. Filipović, Philosophical Interpretation of Connection of Robust Statistics and Fuzzy Logic: The Robust Fuzzy Clustering, IX International Triennial Conference Heavy Machinery HM 2017, June 28 – July 1 2017, Zlatibor (Serbia), Session C, pp. 25-30, ISBN: 978-86-82631-89-7
5. Lj. Dubonjić, V. Filipović, N. Nedić, **V. Đorđević**, Design of Fixed Order  $H^\infty$  Controllers with Specific Settling Time using D-Decomposition, IX International Triennial Conference Heavy Machinery HM 2017, June 28 – July 1 2017, Zlatibor (Serbia), Session C, pp. 37-41, ISBN: 978-86-82631-89-7
6. **V. S. Đorđević**, V. Ž. Filipović, Recursive identification of Takagi-Sugeno models in the presence of piecewise polynomial disturbances, XIII Triennial International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements, 09-10 November 2016, Niš (Serbia), SAUM, pp. 139-142, ISBN: 978-86-6125-170-2
7. Lj. M. Dubonjić, V. Ž. Filipović, **V. S. Đorđević**, Outlier robust one-step-ahead adaptive predictor for Hammerstein models, XIII Triennial International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements, 09-10 November 2016, Niš (Serbia), SAUM, pp. 143-146, ISBN: 978-86-6125-170-2
8. V. Filipović, **V. Đorđević**, Recursive Estimation of the Takagi-Sugeno Models I: Fuzzy Clustering and the Premise Membership Functions Estimation, VIII Triennial International Conference Heavy Machinery, Zlatibor, Serbia, 24 - 26 Jun 2014, Section D, pp. 45-50, ISBN: 978-86-82631-74-3.
9. **V. Đorđević**, V. Filipović, Robust Recursive Identification of Multivariable Processes, VIII Triennial International Conference Heavy Machinery, Zlatibor, Serbia, 24 - 26 June 2014, Section D, pp. 93-98, ISBN: 978-86-82631-74-3.

10. **V. S. Đorđević**, V. Ž. Filipović, Practical Consideration for Identification of Decentralised Control Systems, XII Triennial International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements, Niš, Serbia, 12 – 14 November 2014, pp. 93-96, ISBN: 978-86-6125-117-7.
11. V. Ž. Filipović, **V. S. Đorđević**, Recursive Estimation of the Takagi-Sugeno Models II: Estimation of Hammerstein Models, XII Triennial International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements, Niš, Serbia, 12-14 November 2014, pp. 290-293, ISBN: 978-86-6125-117-7.
12. N. Nedic, D. Prsic, L. Dubonjic, V. Stojanovic, **V. Djordjevic**, Optimal Tuning of PID Controllers for a Hydraulically Driven Parallel Robot Platform Based on Firefly Algorithm, International Conference of Automatics and Informatics, 3-7 October 2013, Sofia, Bulgaria, pp. 277-280, ISSN: 1313-1850.
13. Dragan Pršić, Ljubiša Dubonjić, **Vladimir Đorđević** – Determination of the Describing Function of Nozzle-Flapper Type Pneumatic Servo Valve, 35th International Conference of Production Engineering - ICPE 2013, Kraljevo-Kopaonik, 25-28 September 2013, pp. 1-4, COBISS.SR-ID 204080908
14. **Đorđević V.S.**, Brašić V.S - The Methods for Synthesis and Analysis Controlled Time Delay System with Required Damping Factor, XI Triennial International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements, pp. 44-47, Niš, Serbia, (2012), ISBN: 978-86-6125-072-9
15. **Vladimir Đorđević**, Dragan Pršić, Radovan Bulatović - Optimization of the parameters of PID controller on the model of inverted pendulum by using algorithm of particle swarm optimization, Heavy Machinery 2011, Vol. 7, No 3, pp. 19-26, ISBN 978-86-82631-58-3
16. Zvonko Petrović, Ljubomir Lukić, Radovan Bulatović, **Vladimir Đorđević**, Nenad Nikolić - Optimization of the parameters of broaching machining mode by using the method of particle swarm optimization, Heavy Machinery 2011, Vol. 7, No 5, pp. 73-78, ISBN 978-86-82631-58-3
17. Miljan Veljović, Radovan Bulatović, **Vladimir Đorđević** - Optimization of the plane truss by using the method of particle swarm optimization, Heavy Machinery 2011, Vol. 7, No. 7, pp. 55-60, ISBN 978-86-82631-58-3

На основу изнетих података Комисија сматра да је кандидат Владимир Ђорђевић, дипл. инж. маш. у досадашњем раду показао интересовање, способност и самосталност за научноистраживачки рад. Чита, пише и говори енглески језик, што је неопходно за несметан научноистраживачки рад.

## 6. Предлог ментора са референцама

Комисија предлаже да ментор ове докторске дисертације буде др Владимир Стојановић, доцент Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу. Др Владимир Стојановић испуњава све услове да би био ментор што укључује и потребан број објављених радова у научним часописима са SCI листе.

У прилог томе, наводе се изабране референце из области истраживања предложеног нацрта тезе: пројектовања интелигентних регулатора применом метода вештачке интелигенције, пројектовања оптималних експеримената и улазних сигнала за идентификацију динамичких система, детекције отказа и дијагностике система као и управљања при толерисаним отказима, алгоритама машинског учења и алгоритама управљања заснованих на догађајима.

1. **V. Stojanovic**, V. Filipovic (2014): Adaptive Input Design for Identification of Output Error Model with Constrained Output. Circuits, Systems, and Signal Processing, Vol.33, Num. 1, pp. 97-113. (ISSN: 0278-081X), (IF:1.264) (M22)

2. N. Nedic, D. Prsic, Lj. Dubonjic, **V. Stojanovic**, V. Djordjevic (2014): Optimal cascade hydraulic control for a parallel robot platform by PSO. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.72, Num. 5-8, pp. 1085-1098. (ISSN: 0268-3768), (IF:1.779) **(M21)**
3. **V. Stojanovic**, N. Nedic, D. Prsic, Lj. Dubonjic (2016): Optimal experiment design for identification of ARX models with constrained output in non-Gaussian noise, *Applied Mathematical Modelling* 40(13-14): 6676-6689, DOI: 10.1016/j.apm.2016.02.014, (ISSN: 0307-904X), (IF:2.251) **(M21)**
4. **V. Stojanovic**, N. Nedic, D. Prsic, Lj. Dubonjic, V.Djordjevic (2016): Application of cuckoo search algorithm to constrained control problem of a parallel robot platform, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 87(9-12): 2497-2507, DOI: 10.1007/s00170-016-8627-z, (ISSN: 0268-3768), (IF: 1.458) **(M22)**
5. **Vladimir Stojanovic**, Dragan Prsic (2020): Robust identification for fault detection in presence of non-Gaussian noises: application to hydraulic servo drives, *Nonlinear Dynamics* 100(3):2299-2313, DOI: 10.1007/s11071-020-05616-4, ISSN: 0924-090X, (IF: 4.867) **(M21a)**
6. Ziran Chen, Baoyong Zhang, **Vladimir Stojanovic**, Yijun Zhang, Zhengqiang Zhang (2020): Event-based Fuzzy Control for T-S Fuzzy Networked Systems with Various Data Missing, *Neurocomputing* 417(2020): 322-332, DOI: 10.1016/j.neucom.2020.08.063 (ISSN: 0925-2312), (IF:4.438) **(M21)**
7. Hongfeng Tao, Peng Wang, Yiyang Chen, **Vladimir Stojanovic**, Huizhong Yang (2020): An unsupervised fault diagnosis method for rolling bearing using STFT and generative neural networks, *Journal of the Franklin Institute* 357(11):7286-7307, DOI: DOI:10.1016/j.jfranklin.2020.04.024, ISSN: 0016-0032, (IF: 4.036) **(M21a)**
8. Peng Cheng, Shuping He, **Vladimir Stojanovic**, Xiaoli Luan, Fei Liu (2021): Fuzzy Fault Detection for Markov Jump Systems with Partly Accessible Hidden Information: An Event-Triggered Approach, DOI:10.1109/TCYB.2021.3050209, *IEEE Transactions on Cybernetics*, (ISSN: 2168-2267), (IF:11.079) **(M21a)**
9. Xiang Zhang, Hai Wang, **Vladimir Stojanovic**, Shuping He, Xiaoli Luan, Fei Liu (2021): Asynchronous Fault Detection for Interval Type-2 Fuzzy Nonhomogeneous Higher-level Markov Jump Systems with Uncertain Transition Probabilities, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, DOI: 10.1109/TFUZZ.2021.3086224, ISSN: 1063-6706, (IF: 9.518) **(M21a)**
10. Xin, Yidong Tu, **Vladimir Stojanovic**, Hai Wang, Kaibo Shi, Shuping He, Tianhong Pan (2022): Online Reinforcement Learning Multiplayer Non-Zero Sum Games of Continuous-Time Markov Jump Linear Systems, *Applied Mathematics and Computation*, 412, DOI: 10.1016/j.amc.2021.126537, ISSN: 0096-3003, (IF: 4.091) **(M21a)**

На основу свега наведеног у претходним тачкама овог извештаја Комисија доноси следећи

## ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

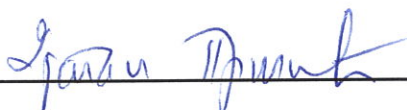
Кандидат Владимир Ђорђевић, дипл. инж. маш. исупио је све предвиђене услове за одобрење израде докторске дисертације. Комисија предлаже Наставно-научном већу Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву и Већу за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу да наведену тему докторске дисертације

### “ИНТЕЛИГЕНТНИ РЕГУЛАТОРИ ЗАСНОВАНИ НА АДАПТИВНОМ ДИНАМИЧКОМ ПРОГРАМИРАЊУ”

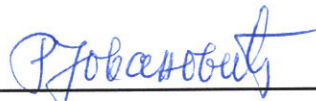
прихвати и одобри за израду. Комисија предлаже да ментор ове докторске дисертације буде др Владимир Стојановић, доцент Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу.

Краљево 08.02.2022. год.

#### Чланови Комисије:



Др Драган Пршић, ванредни професор Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Аутоматско управљање и флуидна техника, председник Комисије



Др Радиша Јовановић, редовни професор Машинског факултета Универзитета у Београду, ужа научна област: Аутоматско управљање, члан Комисије



Др Љубиша Дубоњић, доцент Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Аутоматско управљање и флуидна техника, члан Комисије