

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Оцена научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Луке Ивановића

Одлуком бр. 888/15 од 12.05.2026. године донетој на 929. седници Изборног и Наставног-научног већа Универзитета у Београду - Електротехничког факултета, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Луке Ивановића, под насловом: „Сложени модели машинског учења за анализу и предикцију временских серија у хијерархијским ивица-магла-облак системима управљања“ (енг. *Complex Machine Learning Models for Time Series Analysis and Prediction in Hierarchical Edge-Fog-Cloud Control Systems*).

На основу материјала приложеног уз захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Лука Ивановић је рођен 30.12.1997. године у Ваљеву. Завршио је основну школу „Сестре Илић” у Ваљеву као носилац Вукове дипломе и ђак генерације. Уписао је Ваљевску гимназију (природно-математички смер) коју је завршио као носилац Вукове дипломе. Током школовања освојио је више похвала на државним такмичењима из математике. Електротехнички факултет уписао је 2016. године. Дипломирао је на одсеку за Сигнале и системе 2020. године са просечном оценом 8.83. Дипломски рад „Упоредна анализа алгоритама управљања на лабораторијском температурном процесу“ одбранио је са оценом 10. Дипломске академске – мастер студије на Електротехничком факултету у Београду, на Модулу за сигнале и системе уписао је у октобру 2020. године. Положио је све испите са просечном оценом 9.20. Мастер рад „Праћење и анализа рада индустријског процеса у реалном времену коришћењем ИоТ уређаја и обраде података у облаку“ одбранио је са оценом 10.

Докторске академске студије уписао је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на модулу Управљање системима и обрада сигнала. Положио је све испите са просечном оценом 10. Област његовог истраживања обухвата развој сложених вишепараметарских система за надзор, управљање и контролу у електроенергетици, дигиталну обраду сигнала, машинско учење, обраду и анализу временских серија и примену интелигентних алгоритама одлучивања. У свом досадашњем научноистраживачком раду посебно је усмерен на развој и примену метода машинског учења и напредних алгоритама управљања у области електроенергетике, са акцентом на предикцију временских серија, дијагностику стања опреме, дигиталне близанце и интелигентно управљање у производним енергетским системима и погонима.

Запослен је у Електротехничком институту „Никола Тесла”, Универзитета у Београду, у оквиру групе за развој, управљање и пројектовање система побуде синхроних генератора. У оквиру свог стручног и истраживачког ангажовања учествује у пословима развоја, испитивања, подешавања и пуштања у рад система побуде синхроних генератора и мотора, као и у анализи и унапређењу регулационих и управљачких система у електроенергетским постројењима. Поред инжењерског, активно се бави и научноистраживачким радом, што је резултирало

објављеним радовима у међународним научним часописима (2 рада категорије M21a), домаћим часописима (2 рада категорије M53), међународним конференцијама (3 рада категорије M33) и на домаћим и научним конференцијама (2 рада категорије M63), као и техничким решењима из области система побуде и управљања електроенергетским објектима (једно техничко решење категорије M82).

1.2. Сечено научноистраживачко искуство

Кандидат је током докторских академских студија на Електротехничком факултету Унивезитета у Београду (модул Управљање системима и обрада сигнала) активно учествовао у научним истраживањима, која су била део задатих наставних активности и финално су резултовала полагањем следећих испита:

Шифра	Назив предмета	Наставник	Оцена	ЕСПБ
19Д041МНС	Мрежни наменски системи	Поповић Иван	10	9
19Д051ПРО	Примењена робусна оптимизација	Ракић Александар	10	9
19Д111НАМ	Напредни алгоритми машинског учења	Драшковић Дражен	10	9
19Д051СМП	Савремене методе за пројектовање регулатора у системима управљања	Шекара Томислав	10	9
19Д051СДМУ	Системи за дистрибуирано мерење и управљање	Ракић Александар	10	9
19Д051КЕС	Класификација и естимација сигнала	Ђуровић Жељко	10	9
19Д051УСС	Управљање сложеним системима	Стипановић Душан	10	9

Кандидат је испунио све обавезе предвиђене наставним планом и програмом докторских студија:

Назив обавезе	ЕСП
Припремни рад за пријаву теме докторске дисертације	9
Студијски истраживачки рад I	24
Студијски истраживачки рад II	24

У току досадашњег научноистраживачког рада кандидат је био први аутор једног рада, објављеног у научном часопису међународног значаја на *JCR* листи са *impact* фактором, као и више других радова по следећем:

M21A

Luka Ivanović, Saša D. Milić, Aleksandar Rakić, "Vertical industrial IoT framework powered by transformer models and two-layer fuzzy decision-making", *Applied Soft Computing*, Vol. 195, 2026, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2026.115068>. (M21A, IF:6.6, ISSN: 1568-4946)

Slavko Veinović, Djordje Stojić, **Luka Ivanović**, "Optimized PID2 controller for AVR systems regarding robustness", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 145, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108646>. (M21A, IF:5.0, ISSN: 0142-0615)

M33

L. Ivanović et al., "Black-Box Modeling of Synchronous Generators Using Feedforward Neural Networks," *2023 22nd International Symposium on Power Electronics (Ee)*, Novi Sad, Serbia, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/Ee59906.2023.10346159.

S. D. Milić, **L. Ivanović**, Ž. Janda and M. Dragičević, "Transformer Machine Learning Models for Time Series Electricity Power Forecasting," *2025 24th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*, East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/INFOTEH64129.2025.10959208.

Saša Milić, **Luka Ivanović**, Živko Sokolović, Filip Zec, "A Roadmap for Parameter Selection of TFT and PatchTST Machine Learning Models", *25rd International Symposium INFOTEH-JAHORINA*, 18-20 March 2026, Jahorina, RS, BiH, O-10.3 (200).

M53

L. Ivanović, S. D. Milić, Ž. Sokolović, A. Rakić. "Komparativna analiza dubokih neuronskih mreža i algoritama sa pojačanjem gradijenta u dugoročnom predviđanju snage vetra", *Zbornik radova (Elektrotehnički institut "Nikola Tesla")*, Vol. 34, pp. 15-36, 2024. doi: [10.5937/zeint34-51258](https://doi.org/10.5937/zeint34-51258) (**M53**, ISSN: 0350-8528)

I. Klasnić, S. Veinović, D. Joksimović, **L. Ivanović**, B. Radojičić, M. Brdarević, "Modifikacija realizacije limitera minimalne pobude u okviru sistema pobude generatora bloka B1 u TE Nikola Tesla B", *Zbornik radova (Elektrotehnički institut "Nikola Tesla")*, 2024;(34):37-48. doi: [10.5937/zeint34-54005](https://doi.org/10.5937/zeint34-54005) (**M53**, ISSN: 0350-8528)

M63

L. Ivanović, I. Klasnić, S. Milić, Komparativna analiza rekurentnih i transformer modela mašinskog učenja za predikciju proizvodnje aktivne snage vetrogeneratora, *37. savetovanje CIGRE*, Srbija, 2025.

S. Milić, M. Kožicić, **L. Ivanović**, M. Dragičević, Transformer modeli mašinskog učenja za predviđanje vremenskih serija u elektroenergetici, *37. savetovanje CIGRE*, Srbija, 2025.

M82

Savremeni regulator pobude INTROL sinhronog generatora sa unapređenom naponskom regulacijom i stabilizatorom elektroenergetskog sistema tipa PSS2B.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Дана 11.06.2026. године, кандидат Лука Ивановић је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду имао јавни усмени испит о подобности теме докторске дисертације, пред Комисијом у саставу:

- др Вељко Папић, ванредни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет,
- др Саша Милић, научни саветник, Универзитет у Београду – Електротехнички институт „Никола Тесла“,
- др Милета Жарковић, ванредни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет.

Комисија је излагање кандидата оценила оценом **задовољно**.

На основу приказа резултата досадашњег рада кандидата на докторском испиту, и узимајући у обзир целокупну поднету документацију, Комисија сматра да је кандидат стекао неопходно искуство за научно-истраживачки рад, као и да је способан за самосталан рад на изради докторске дисертације и остваривање резултата који могу бити вредновани од стране међународне научне заједнице. На основу претходно наведеног, **комисија сматра да је кандидат подобан за рад на предложеној теми.**

2. Предмет и циљ истраживања

Временске серије представљају један од најзначајнијих облика података у савременим техничким, индустријским, енергетским и информационим системима. Практично сви сложени системи који поседују мерне, управљачке или надзорне функције генеришу податке у времену, па се њихово понашање, стање и динамика могу описати управо временским серијама. Такви подаци настају у електроенергетским постројењима, производним процесима, системима аутоматике, финансијским и комуникационим системима, као и у великом броју IoT и IIoT окружења. Услед тога, анализа и предикција временских серија представљају кључни истраживачки проблем у бројним областима електротехнике.

Савремени приступи анализи временских серија обухватају широк спектар метода, почев од класичних статистичких модела, преко рекурентних неуронских мрежа, па све до сложених архитектура дубоког учења [1–3]. Иако је у последњих неколико година остварен значајан напредак у тачности предикције, у пракси и даље постоји више отворених проблема. Најпре, не постоји универзалан модел који даје најбоље резултате за све типове серија, све хоризонте и све услове примене. Поред тога, модели који показују високу тачност често су хардверско захтевни, осетљиви на структуру података и слабо прилагодљиви окружењима са хетерогеним ресурсима [4, 5].

Предмет истраживања у предложеној докторској дисертацији јесте развој методолошког оквира за анализу и предикцију униваријантних и мултиваријантних временских серија применом сложених модела машинског учења, који користе резултате предикције у хијерархијским ивица-магла-облак системима управљања [6]. У том смислу, тежиште истраживања биће на моделима за временске серије, селектованим и прилагођеним за прва два хијерархијска нивоа (ивица - edge, магла - fog) у вертикалном концепту „индустријског интернета ствари“ (IIoT) како би се подржали и унапредили алгоритми одлучивања на највишем (облак - cloud) нивоу.

Под анализом временских серија у оквиру ове дисертације подразумева се формално и математичко испитивање њихових карактеристика, укључујући декомпозицију на тренд, сезонску и резидуалну компоненту, анализу расподеле, асиметрије, закривљености, присуства шума, аутокорелационих и унакрсних-корелационих особина, као и разликовање периодичних и фреквенцијских образаца [7]. Циљ ове анализе није само дескрипција података, већ и идентификација оних карактеристика које су релевантне за избор класе модела, избор хоризонта предикције и процену очекиване прорачунске сложености.

Под предикцијом временских серија подразумева се испитивање краткорочне и дугорочне прогнозе, при чему ће се разматрати и детерминистички и стохастички приступи. Посебно ће бити анализирано како промена хоризонта предикције утиче на стабилност модела, деградацију тачности, понашање резидуала и способност модела да задржи информативне временске и структурне зависности. У оквиру тога биће поређене различите класе модела, укључујући

класичне статистичке методе, рекурентне неуронске мреже и сложене моделе дубоког учења намењене секвенцијалним подацима.

У предложеном истраживању посебно место имаће cost-computing аспект, односно анализа рачунарске цене примене модела. Тај аспект обухвата време обучавања, време закључивања (inference), меморијску потрошњу, број параметара, осетљивост на величину улазног прозора, број улазних канала, величину излазног хоризонта и сложеност стохастичких излаза. Научна вредност овог дела истраживања је у томе што омогућава да избор модела не буде заснован искључиво на тачности, већ на укупној рационалности примене у конкретном систему.

Идеја је да се на нивоу ивице обезбеди основна анализа и брза реакција, на нивоу магле обједини дубља обрада и средњорочна прогноза, како би апликације на нивоу облака ефикасно остваривале сложене задатке одлучивања. На тај начин резултати развијених модела не би били посматрани изоловано, већ као део ширег архитектонског оквира система одлучивања.

Циљ истраживања је формулисање јединственог и проширеног научног оквира који ће повезати математичку анализу временских серија, сложене моделе машинског учења, различите типове предикције у хијерархијским ивица-магла-облак системима управљања. Крајњи допринос дисертације треба да се огледа у развоју практично применљивог вертикално устројеног хијерархијског оквира управљања, контроле, надзора и предикције. Значај предложене теме огледа се у њеној интердисциплинарности и применљивости. Она треба да обједини анализу сигнала, машинско учење, обраду података и предиктивну аналитику. Тако постављена тема има и теоријски значај, јер омогућава развој нових критеријума и правила за избор модела, и практични значај, јер омогућава примену вертикалног хијерархијског оквира управљања у системима где је потребно комбиновати поуздану прогнозу и ограничене ресурсе обраде.

Литература

- [1] Y. Nie, N. H. Nguyen, P. Sinthong, and J. Kalagnanam, "A time series is worth 64 words: Long-term forecasting with transformers," *arXiv preprint*, arXiv:2211.14730v2, 2023. doi: 10.48550/arXiv.2211.14730.
- [2] B. Lim, S. Ö. Arık, N. Loeff, and T. Pfister, "Temporal fusion transformers for interpretable multi-horizon time series forecasting," *Int. J. Forecast.*, vol. 37, no. 4, pp. 1748–1764, Oct.–Dec. 2021. doi: 10.1016/j.ijforecast.2021.03.012.
- [3] Y. Wang, H. Wu, J. Dong, Y. Liu, M. Long, and J. Wang, "Deep time series models: A comprehensive survey and benchmark," *arXiv preprint*, arXiv:2407.13278, 2024. doi: 10.48550/arXiv.2407.13278.
- [4] S. Ahmad, I. Shakeel, S. Mehruz, and J. Ahmad, "Deep learning models for cloud, edge, fog, and IoT computing paradigms: Survey, recent advances, and future directions," *Comput. Sci. Rev.*, vol. 49, Art. no. 100568, 2023. doi: 10.1016/j.cosrev.2023.100568.
- [5] M. G. S. Murshed, C. Murphy, D. Hou, N. Khan, G. Ananthanarayanan, and F. Hussain, "Machine learning at the network edge: A survey," *ACM Comput. Surv.*, vol. 54, no. 8, Art. no. 170, pp. 1–37, 2021. doi: 10.48550/arXiv.1908.00080.
- [6] R. Kumar and N. Agrawal, "Analysis of multi-dimensional Industrial IoT (IIoT) data in Edge-Fog-Cloud based architectural frameworks: A survey on current state and research challenges," *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 35, Art. no. 100504, 2023. doi: 10.1016/j.jii.2023.100504.

- [7] G. Dudek, "STD: A seasonal-trend-dispersion decomposition of time series," *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, vol. 36, no. 1, pp. 1–13, 2024. doi: 10.48550/arXiv.2204.10398.

3. Полазне хипотезе

Основне претпоставке у предложеном истраживању су следеће:

- да је могуће дефинисати скуп математичких, статистичких и структурних дескриптора временских серија који могу послужити као основа за систематичан избор модела и његове конфигурације;
- да сложени модели машинског учења могу остварити боље перформансе од класичних приступа у значајном броју реалних сценарија, али да њихова супериорност зависи од типа серије, дужине хоризонта, броја улазних варијабли и начина репрезентације података;
- да за краткорочну и дугорочну, детерминистичку и стохастичку предикцију не постоји јединствено најбоље решење, већ да је неопходан адаптиван и хијерархијски приступ избору модела;
- да је могуће формулисати критеријуме који интегришу тачност прогнозе, подешавање неизвесности, стабилност модела и рачунарску цену његове примене;
- да повезивање предиктивних модела у вишеслојном окружењу омогућава бољу оперативну примену добијених резултата него изоловано посматрање самих модела.

4. Методе истраживања

За потребе истраживања извршиће се систематизовано прикупљање и критичка анализа релевантне научне литературе из области анализе временских серија, статистичког моделовања, дубоког учења и хијерархијски организованих управљачких архитектура. Биће разматрани радови који се односе на униваријантне и мултиваријантне серије, краткорочну и дугорочну прогнозу, као и на детерминистичке и стохастичке приступе.

У теоријском делу биће примењене методе математичке и статистичке анализе временских серија. То обухвата анализу стационарности, декомпозицију серије, аутокорељацију, спектралну анализу, анализу шума, као и испитивање резидуалних компоненти. Циљ ове фазе јесте формулисање дескриптора који су релевантни за класификацију проблема и избор класе предиктивних модела.

У експерименталном делу истраживања биће реализована имплементација, обучавање, валидација и тестирање више класа модела. Поређење ће обухватити статистичке моделе, рекурентне архитектуре и сложене трансформер моделе дубоког учења за временске серије. Модели ће бити евалуирани на репрезентативним скуповима података кроз јединствене протоколе, уз анализу утицаја дужине контекста, броја варијабли, типа излаза и хоризонта предикције.

За детерминистичке приступе користиће се стандардне метрике грешке, док ће за стохастичке приступе бити анализирани квантили, интервали предикције, калибрација и поузданост. Поред тога, за све класе модела биће мерени параметри који се односе на прорачунски трошак, као што су време обучавања, време извршавања, меморијска сложеност и осетљивост на промене величине улаза и хоризонта.

Посебан методолошки корак односиће се на формулисање оптимизационог поступка за избор модела и хиперпараметара. На основу добијених дескриптора серије и

експерименталних резултата биће развијен критеријум за избор модела који повезује квалитет прогнозе, тип задатка и рачунарску цену.

У завршном делу методологије биће разматрана интеграција предиктивних резултата распоређених по нивоима ивице и магле. У том контексту биће анализирано који типови обраде и одлучивања су погодни за поједине слојеве и на који начин резултати предикције могу бити искоришћени као основа за оперативне или оптимизационе одлуке.

5. Очекивани научни доприноси

1. Систематизација и продубљена анализа сложених модела машинског учења за униваријантне и мултиваријантне временске серије, са посебним освртом на њихову применљивост у различитим типовима задатака;
2. Дефинисање формалног оквира за повезивање математичких и статистичких карактеристика временских серија са избором класе модела и конфигурације модела;
3. Утврђивање односа између хоризонта предикције, типа излаза, структуре података и понашања сложених модела машинског учења;
4. Развој критеријума за вредновање модела који, поред тачности, укључују и стабилност, калибрацију неизвесности и рачунарску цену;
5. Развој оптимизационог поступка за избор архитектуре и хиперпараметара у зависности од карактеристика временске серије и хардверског ограничења;
6. Валидација предложеног оквира на репрезентативним скуповима података и формулисање смерница за његову примену у реалним системима.

6. План истраживања

У првој фази истраживања детаљно би се размотрила релевантна литература из области временских серија, машинског учења, дубоког учења, стохастичке прогнозе, *cost-computing* анализе, хијерархијског ивица-магла-облак управљања и вишепараметарског одлучивања.

Друга фаза била би посвећена формалној математичкој и статистичкој анализи временских серија, са циљем издвајања карактеристика релевантних за класификацију проблема и избор модела.

У трећој фази извршила би се имплементација и поређење више класа предиктивних модела у условима краткорочне и дугорочне, детерминистичке и стохастичке прогнозе.

Четврта фаза обухватала би анализу рачунарске цене и формулисање критеријума за оптималан избор модела и хиперпараметара.

У петој фази би се карактеристике изабраних и примењених модела анализирали и тестирали на реалним скуповима података са циљем њихове оптималне примене у хијерархијском ивица-магла-облак окружењу.

У завршној фази би се извршила валидација више МЛ модела унутар вертикалног *IIoT* оквира, спровело би се поређење са референтним приступима и формулисали закључци и смернице за будућа истраживања.

7. Закључак и предлог

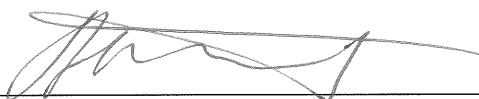
На основу приложене документације и непосредног увида у досадашњи научни рад кандидата Луке Ивановића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, Комисија закључује следеће:

- Кандидат испуњава све формалне и суштинске услове прописане законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Београду и Статутом Електротехничког факултета Универзитета у Београду, за израду докторске дисертације.
- Предложена тема „Сложени модели машинског учења за анализу и предикцију временских серија у хијерархијским ивица-магла-облак системима управљања“ (енг. *Complex Machine Learning Models for Time Series Analysis and Prediction in Hierarchical Edge-Fog-Cloud Control Systems*) научно је заснована и резултати до којих ће се доћи током израде ове дисертације представљаће значајан и оригинални допринос. Тема припада ужој научној области Аутоматика.

На основу претходно изложеног, комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да кандидату Луки Ивановићу одобри израду докторске дисертације под насловом: „Сложени модели машинског учења за анализу и предикцију временских серија у хијерархијским ивица-магла-облак системима управљања“ (енг. *Complex Machine Learning Models for Time Series Analysis and Prediction in Hierarchical Edge-Fog-Cloud Control Systems*), а за ментора се предлаже проф. др Александар Ракић, редовни професор Електротехничког факултета у Београду.

У Београду 12.06.2026. године

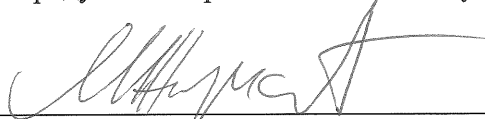
Чланови комисије



др Вељко Папић, ванредни професор
Универзитет у Београду - Електротехнички факултет



др Саша Милић, научни саветник
Универзитет у Београду – Електротехнички институт „Никола Тесла“



др Милета Жарковић, ванредни професор
Универзитет у Београду - Електротехнички факултет