

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

ВЕЋУ ЗА СТУДИЈЕ ПРИ УНИВЕРЗИТЕТУ

РЕФЕРАТ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ КАНДИДАТА

Студијски програм: Интелигентни системи

Комисија у саставу:

1. др Драган Ђурић, редовни професор, Факултет организационих наука, Универзитет у Београду
2. др Милета Жарковић, ванредни професор, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду
3. др Бојан Томић, редовни професор, Факултет организационих наука, Универзитет у Београду

оформљена 27.10.2025. године одлуком Већа за студије при Универзитету у Београду доставља реферат о оцени докторске дисертације

**„Побољшање тачности краткорочног предвиђања електричног
оптерећења коришћењем предиктивног моделирања заснованог на
вештачкој интелигенцији“**

кандидата

**Владимира Урошевића, мастер инж. организационих наука и дипл. инж.
информатике.**

ОСНОВНИ ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ И ДИСЕРТАЦИЈИ

Владимир Урошевић је рођен 28.10.1976. године у Пожаревцу, Србија. Уписао је Технички факултет „Михајло Пупин“ Универзитета у Новом Саду,

студијски програм – Дипломирани инжењер информатике 2005 године. Дипломирао је 2009. године и стекао звање Дипломирани инжењер информатике. Мастер студије је уписао 2017. године на Факултету организационих наука Универзитета у Београду – студијски програм Софтверско инжењерство. Мастер студије је завршио 2019. године, чиме је стекао звање Мастер инжењер организационих наука. Од 2019. године је докторанд мултидисциплинарних докторских студија Универзитета у Београду – студијски програм Интелигентни системи. Студентску праксу за докторске студије одрадио је на Институту „Михајло Пупин“ у Београду у периоду од 01.03.2021. до 16.05.2021. године. Рецензент је у следећим научним часописима:

- Energy systems, Springer Nature, ISSN: 1868-3967
- International journal of computational intelligence systems, Springer Nature, ISSN: 1875-6883
- International journal of fuzzy systems, Springer Nature, ISSN: 1562-2479
- Soft computing, Springer Nature, ISSN: 1432-7643

Од 2004. ради у US Steel d.o.o на пословима програмера, а касније и пројектанта информационих система. У US Steel d.o.o. Владимир је завршио бројне специјалистичке курсеве из одласти софтверског инжењерства и пројект менаџмента. У „ЕПС Снабдевање“ д.о.о. прелази 2013. године на место водећег стручног сарадника за информационе системе. У ЈП ЕПС био је руководиоца великих пројеката „Рекламације“ и „Увид у рачун“. 2019. године прелази у Deloitte d.o.o. на позицију Вишег консултанта, где је, између осталог, развио и имплементирао Систем за краткорочну прогнозу електричне енергије. Од 2020. године ради у Generali Development d.o.o. на позицијама Senior Java Backend Developer и AI Engineer.

Докторска дисертација **„Побољшање тачности краткорочног предвиђања електричног оптерећења коришћењем предиктивног моделирања заснованог на вештачкој интелигенцији“** броји 144 страна и организована је у 9 поглавља.

ПРЕДМЕТ И ЦИЉ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

Предмет предложене дисертације је краткорочна прогноза електричне енергије. Прогноза потрошње електричне енергије представља први и најважнији корак у процесу управљања потрошњом, доношењу

инвестиционих одлука у трговини електричном енергијом и планирању развоја електроенергетског система. У зависности од временског хоризонта на ком се врши прогноза, извршена је класификација на:

- Краткорочну прогнозу
- Средњорочну прогнозу
- Дугорочну прогнозу

Временски хоризонт код краткорочне прогнозе електричне енергије, креће се од неколико минута до неколико дана (углавном до седам). Средњорочна прогноза се врши за период од неколико недеља до неколико месеци, док се дугорочна прогноза врши за период од неколико месеци до неколико година или неколико деценија.

Краткорочна прогноза потрошње електричне енергије користи се код: оперативног планирања, балансирања мреже, оптимизације производње и потрошње у реалном времену.

За краткорочну предикцију потрошње електричне енергије коришћени су различити модели. Можемо их поделити на: статистичке моделе, моделе који су засновани на вештачкој интелигенцији и хибридне моделе. Неки од најпознатијих статистичких модела су: ауторегресивни модели (АР), ауторегресивни интегрисани покретни просек (АРИМА), експоненцијално изглађивање, линеарна регресија, генерализовани линеарни модели (ГЛМ), Модели Гаусових процеса. Моделе који су засновани на вештачкој интелигенцији а користе се код краткорочне предикције електричне енергије, можемо груписати на: моделе на бази фази логике, моделе машинског учења, моделе који користе неуронске мреже, моделе дубоког учења, Бајесове мреже, учење са подстицајем. Сви наведени приступи имају своје предности и ограничења и не може се издвојити супериоран модел у односу на друге. Зато се практикује употреба хибридних модела. Хибридни модели су они модели који комбинују два или више наведених приступа. Хибридни модели могу бити ограничени својом сложеностју, подешавањем параметара и скалабилности, као и њиховим потенцијалним преоптерећењем и редундантношћу података.

Најзначајнији подаци на основу којих се врши краткорочна прогноза су историјски подаци о потрошњи. Историјски подаци о потрошњи поседују три типа сезоналности и то: дневну, седмичну и годишњу. Између

историјске потрошње и прогнозиране потрошње постоји одређена корелација. Постојање веће корелације између предикторских варијабли и зависне променљиве је пожељна, јер побољшава тачност предикције.

Поред ових података, могу се користити и други подаци који представљају утицај економских, социјалних и метеоролошких фактора.

Техника груписања улазних података за предвиђање електричне потрошње групише сличне обрасце оптерећења заједно, омогућавајући прецизнија предвиђања. Тиме се поред препознавања образаца може постићи и смањење варијабилности унутар сваке групе што олакшава изградњу прецизнијих модела. Груписањем података, алгоритми учења могу да се фокусирају на појединачне трендове и да дају прецизније прогнозе.

ЦИЉЕВИ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Циљеви докторске дисертације су унапређење тачности и поузданости краткорочне предикције електричног оптерећења кроз примену фиксне и флексибилне кластеризације улазних података, и анализе корелације улазних података. Ови циљеви укључују испитивање утицаја корелације између предвиђеног и претходних дана, временског груписања по данима и сатима, као и флексибилног прилагођавања кластеризације на основу уочених образаца у подацима, у циљу повећана стабилност и тачности предиктивних модела, са посебним фокусом на технике машинског учења и методе засноване на Фази логици и АНФИС моделима.

Основне новине којима теза доприноси корпусу знања и развоја модела за краткорочну предикцију електричног оптерећења су:

- Нови NDA приступ за формирање података који имају знатно већу корелацију са прогнозираним оптерећењем од традиционалних приступа.
- Нови начин фиксног груписања по дану у недељи и сату, који се показао супериоран у поређењу са традиционалним груписањима код коришћења Бајесове вишеструке линеарне регресије за краткорочну предикцију електричног оптерећења.
- Нови начин решавања проблема одступања од линеарне зависности предиктора Сезона у односу на оптерећење.

- Нови предложени алгоритам трансформације кластера за корекцију проблема хетероскедастичности.
- Нови предложени FLEX модел, заснован на флексибилној селекцији модела на бази флексибилног прилагођавања кластеризације, који је показао супериорне резултате у односу на традиционалне методе фиксног кластеровања.

ОСНОВНЕ ХИПОТЕЗЕ ОД КОЈИХ СЕ ПОЛАЗИЛО У ИСТРАЖИВАЊУ

Хипотезе које представљају основу за истраживања су:

- Употреба улазних података са већом корелацијом између предвиђеног дана и претходних дана статистички значајно повећава тачност краткорочне прогнозе оптерећења код употребе Фази логике и АНФИС модела, у поређењу са традиционалним приступом који улазне податке групишу према данима у недељи.
- Употреба улазних података са већом корелацијом између предвиђеног дана и претходних дана статистички значајно повећава тачност краткорочне прогнозе оптерећења код употребе напредних модела машинског учења као што су: вишеслојни перцептрон (MLP), случајна шума (Random Forest), гребена регресија (Ridge regression), регресија потпорних вектора (SVR), регресија са екстремним градираним бустингом (XGB), у поређењу са традиционалним приступом који улазне податке групишу према данима у недељи.
- Кластеризација улазних података по данима у седмици и сатима код Бајесове вишеструке линеарне регресије статистички значајно повећава тачност прогнозе код краткорочног предвиђања електричног оптерећења у поређењу са кластеризацијама на основу: дана у недељи, сата и коришћењем улазних података без кластеровања.
- Флексибилна селекција модела заснована на кластерима, уз коришћење K-Means алгоритма, статистички значајно повећава тачност модела гребене регресије у поређењу са кластеризацијама на основу: дана у недељи, сата и коришћењем улазних података без кластеровања.

КРАТАК ОПИС САДРЖАЈА ДИСЕРТАЦИЈЕ

У првом поглављу представљен је увод у област краткорочне прогнозе електричног оптерећења. Објашњавају се са појмови електричне енергије, електроенергетског система па све до предвиђања електричног оптерећења. Значајан део овог поглавља је посвећен карактеристикама података за краткорочно предвиђање електричног оптерећења.

Друго поглавље описује методе краткорочног предвиђања електричног оптерећења са посебним фокусом на методе које су коришћене у експериментима у овој дисертацији.

Треће поглавље указује на значај груписања података у циљу побољшања тачности краткорочне прогнозе електричног оптерећења. Такође, фокус је на методама које су коришћене у експериментима у овој дисертацији.

Четврто поглавље садржи преглед релевантне литературе, са фокусом на постојеће методе краткорочне прогнозе електричног оптерећења које користе технике кластеризације као и примену вештачке интелигенције у овој области.

Пето поглавље представља Приступ суседног дана и његову примену на краткорочну прогнозу електричног оптерећења. Након описа података и формирања модела, извршена су два истраживања који су показали предност Приступа суседног дана у односу на традиционални Приступ дана истог типа. Прво истраживање се односи на фази логику и ANFIS, док је друго истраживање наставак првог и односи се на напредне моделе машинског учења.

Шесто поглавље истражује временско груписање и његову примену код Бајесове вишеструке линеарне регресије. Представљен је нови начин груписања, по сату и дану у недељи, који надмашује по тачности резултата до тада коришћене начине временског груписања по сату или по дану у недељи.

Седмо поглавље се бави флексибилним приступом кластерисању улазних података. На почетку поглавља, разматрају се разлике између фиксне и флексибилне кластеризације. Представља се нови приступ за краткорочну прогнозу електричног оптерећења који је базиран на флексибилној

селекцији модела и пореди се са традиционалним методама краткорочне прогнозе електричног оптерећења који користе фиксну кластеризацију.

Осмо поглавље се бави потенцијалом за примену представљених резултата истраживања у овој дисертацији у стварним електроенергетским системима. Разматрају се практичне користи добијених резултата који се огледају у побољшању тачности и стабилности модела. Такође, анализирају се предуслови за практичну имплементацију као и потенцијална интеграција у постојеће софтверске системе оперативног планирања.

У деветом поглављу су изнети су закључци, дат је преглед најважнијих резултата, потврђеност хипотеза и предлози за будућа истраживања.

ОСТВАРЕНИ РЕЗУЛТАТИ И НАУЧНИ ДОПРИНОС ДИСЕРТАЦИЈЕ

Резултати ове дисертације унапређују поље краткорочног предвиђања електричног оптерећења у следећем:

- Развој и примена нових модела заснованих на вештачкој интелигенцији за краткорочно предвиђање електричног оптерећења, који узимају у обзир корелације између предвиђеног дана и претходних дана.
- Побољшана тачност предвиђања модела за краткорочно предвиђање електричног оптерећења.
- Емпиријска демонстрација важности кластеризације по данима у седмици и сатима за побољшање тачности предвиђања помоћу вишеструке линеарне регресије. Овај допринос може пружити дубље разумевање како груписање података може утицати на перформансе модела.
- Демонстрација предности флексибилне кластеризације помоћу метода машинског учења у односу на фиксно кластеровање. Овај допринос може довести до динамичнијих и прилагодљивијих система за предвиђање оптерећења.

- Применљивост резултата и метода за електроенергетске системе, који могу користити предложене моделе за побољшање управљања ресурсима.
- Развој нових теоријских оквира и модела који објашњавају и предвиђају обрасце потрошње електричне енергије на краткорочном нивоу, узимајући у обзир сложене корелације и динамичке промене у подацима.

ОБЈАВЉЕНИ И САОПШТЕНИ РЕЗУЛТАТИ

Истакнути међународни часопис (M22)

1. Urošević, Vladimir. "Determining the model for short-term load forecasting using fuzzy logic and ANFIS." *Soft Computing* (2024): 1-14.
2. Urošević, Vladimir, and Andrej M. Savić. "Temporal clustering for accurate short-term load forecasting using Bayesian multiple linear regression." *Applied Intelligence* 55.1 (2025): 19.

Конференције и скупови

1. V. Urošević and S. Dimitrijević, "Optimum input sequence size for a sliding window-based LSTM neural network used in short-term electrical load forecasting," *2021 29th Telecommunications Forum (TELFOR)*, Belgrade, Serbia, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/TELFOR52709.2021.9653206.
2. V. Urošević and Ž. Marković, "KRATKOROČNA PROGNOZA POTROŠNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE PUTEM MODIFIKOVANOG KNN ALGORITMA I ARIMA STATISTIČKOG MODELA," in *Zbornik radova XII savetovanja CIRED Srbija 2021*, Vrnjačka Banja, 2021, paper R-5.01.
3. V. Urošević and Ž. Marković, "KRATKOROČNA PROGNOZA POTROŠNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE PUTEM VIŠESTRUKЕ LINEARNE REGRESIJE (MLR) I NEURALNE MREŽE SA VIŠESLOJNIM PERCEPTRONOM (MLP)," in *36. savetovanje CIGRE Srbija 2023: Fleksibilnost elektroenergetskog sistema*, University Library in Kragujevac, 2023, pp. 1062–1073. doi: 10.46793/CIGRE36.1062U.

ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

Анализа докторске дисертације Владимира Урошевића под насловом „Побољшање тачности краткорочног предвиђања електричног оптерећења коришћењем предиктивног моделирања заснованог на вештачкој интелигенцији” показује да је кандидат успешно остварио постављене циљеве истраживања, примењујући методолошки усклађен, свеобухватан и научно утемељен приступ. Рад представља оригиналан и значајан допринос у области интелигентних система и анализе енергетских података, са посебним нагласком на примену савремених метода вештачке интелигенције у краткорочној прогнози електричног оптерећења. Кандидат је истраживање спровео детаљно и систематично, показујући висок ниво аналитичког мишљења, техничке прецизности и посвећености, чиме је унапредио постојећа знања у овој интердисциплинарној области.

Посебно се истиче увођење и анализа Приступа суседног дана (енг. Neighborhood Days Approach - NDA), који показује предност у односу на традиционалне методе сегментације података и обезбеђује већу тачност прогнозе у широком спектру модела вештачке интелигенције. Додатни допринос представља и примена временског груписања по дану у недељи и сату, која у контексту Бајесове вишеструке линеарне регресије омогућава формирање хомогенијих сегмената података и значајно побољшава стабилност параметара модела и тачност прогнозе. Значајан допринос представља и развој флексибилне кластеризације засноване на комбинацији аутоенкодера са отклањањем шума (енг. Denoising Autoencoder - DAE), K-Means алгоритма и флексибилне селекције модела, која, у поређењу са фиксним кластерисањем, пружа статистички поузданије и прецизније прогнозе. Резултати су аргументовано представљени, јасно интерпретирани и поткрепљени адекватним статистичким анализама, укључујући тестове аутокорељације, хетероскедастичности и рангирања модела.

Дисертација се одликује високим степеном интердисциплинарности и методолошке зрелости. Кандидат је успешно интегрисао методе вештачке интелигенције, технике обраде временских серија и напредне статистичке процедуре, представљајући резултате на логичан, прегледан и научно кредибилан начин. Рад представља значајан допринос унапређењу

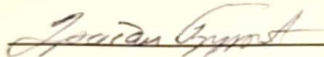
методологије краткорочног предвиђања електричног оптерећења и потврђује истраживачку зрелост кандидата.

ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ КОМИСИЈЕ ЗА ОДБРАНУ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

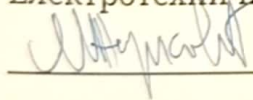
Комисија за оцену докторске дисертације констатује да је дисертација „Побољшање тачности краткорочног предвиђања електричног оптерећења коришћењем предиктивног моделирања заснованог на вештачкој интелигенцији ” кандидата Владимира Урошевића оригинално и самостално научно дело и да су се стекли услови за њену јавну одбрану. Комисија стога предлаже Већу за студије при Универзитету у Београду да прихвати с позитивном оценом реферат о оцени докторске дисертације под насловом „Побољшање тачности краткорочног предвиђања електричног оптерећења коришћењем предиктивног моделирања заснованог на вештачкој интелигенцији”, коју је урадио кандидат Владимир Урошевић под менторством проф. др Зорана Шеварца и др Андреја Савића.

У Београду, 25.11.2025. год.

др Драган Ђурић, редовни професор
Факултет организационих наука, Универзитет у Београду



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



др Бојан Томић, редовни професор
Факултет организационих наука, Универзитет у Београду

