

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Оцена научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Марка Новковића.

Одлуком Наставно-научног већа бр. 55/28, на 903. Седници Изборног и Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду, одржаној у уторак, 14.01.2025. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Марка Новковића за израду докторске дисертације и научне заснованости теме „Развој детаљног динамичког термо-хидрауличког модела енергетских уљних трансформатора“.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Марко Новковић рођен је 10. фебруара 1995. године у Панчеву. Првих шест разреда основне школе завршио је у Баваништу. Седми и осми разред завршио је у основној школи при Математичкој гимназији у Београду као носилац дипломе „Вук Караџић“. Потом уписује Математичку гимназију у Београду, коју је успешно завршио 2014. године, такође, као носилац дипломе „Вук Караџић“.

Током основног и средњошколског образовања учествовао је на бројним такмичењима из математике и физике. На државним такмичењима освојио је једну прву, две друге и три треће награде. Био је учесник Српске математичке олимпијаде за ученике основних школа 2010. године.

На основу диплома са државних такмичења, 2014. године уписује основне академске студије на Електротехничком факултету у Београду, без полагања пријемног испита. Дипломирао је 2018. године на одсеку за Енергетику. Дипломски рад под називом „Софтверска реализација обраде резултата типског огледа загревања уљног енергетског трансформатора“ одбранио је са оценом 10 код проф. др Зорана Радаковића. Основне академске студије завршио са просечном оценом 9,73.

Мастер академске студије на Електротехничком факултету у Београду, на модулу Енергетска ефикасност завршио је 2019. године са просечном оценом 10,00. Мастер рад под називом

„Алгоритам и софтвер за скраћење типског огледа загревања уљних трансформатора“ одбранио је у септембру 2019. године код проф. др Зорана Радаковића.

У октобру 2019. године уписује докторске академске студије на Електротехничком факултету у Београду, на модулу Енергетски претварачи и погони.

Стипендиста Фонда за младе таленте Републике Србије од 2011. до 2018. године.

У току 2017. године обавио је стручну праксу у Нафтној индустрији Србије, Рафинерија нафте Панчево. У школској 2017/18. години био је стипендиста предузећа ЕМС АД за студенте из области енергетике. На основу ове стипендије обавио је стручну праксу у Дирекцији за подршку преносном систему, Сектор за високонапонска постројења, Служба за високонапонску опрему.

Од 14. децембра 2018. године запослен је на Катедри за енергетске претвараче и погоне Електротехничког факултета Универзитета у Београду, у звању сарадника у настави, а од 14. децембра 2019. године у звању асистента. Ангажован је на извођењу рачунских и лабораторијских вежби из следећих предмета: Пројектовање фотонапонских система, Електроенергетске инсталације ниског напона, Пренос топлоте, Енергетски ефикасни електротермички процеси, Специјалне електричне инсталације, Термички процеси у електроенергетици, Електричне инсталације ниског напона 2.

Марко Новковић је ангажован као учесник на следећим пројектима:

Међународни пројекти:

- Софтвер за динамичко термичко моделовање трансформатора, HYDRO-QUEBEC, од јула 2021.

Научни пројекти:

- Повећање енергетске ефикасности, поузданости и расположивости електрана ЕПС-а утврђивањем погонских дијаграма генератора и применом нових метода испитивања и даљинског надзора-НАСТАВАК, Министарство просвете, науке и технолошког развоја, од фебруара 2020.
- Систем за прикупљање података о температури са бежичним преносом података од дистрибуираних сензора (HEATMONITOR), Министарство просвете, науке и технолошког развоја, Пројекти-Развој високог образовања, октобар 2019.

Комерцијални пројекти:

- Студија и стручно мишљење о примени соларних каблова као AGL секундарних каблова, VINCI TERNA CONSTRUCTION JV d.o.o., октобар 2024.
- Израда судија о могућности повећања електроенергетског капацитета и модернизације трансформаторске станице Аеродром, АД Аеродром Никола Тесла, април 2024.
- Стручна мишљења у трансформаторској техници COMEL TRANSFORMATORI d.o.o. Београд -Рипањ, Мај 2022.
- Оптимизација конструкције енергетских уљних трансформатора у циљу повећавања ефикасности хлађења, уштеде материјала и смањења производних трошкова, Иновациони фонд – Ваучери, COMEL TRANSFORMATORI d.o.o. Београд-Рипањ, април 2021.
- ТЕКО БЗ : Консултантске услуге из електроенергетике, телекомуникација и система управљања, од септембра 2020.

1.2. Сечено научноистраживачко искуство

Током докторских академских студија кандидат је испунио све предвиђене обавезе и положио све испите са оценом 10:

Назив испита или обавезе	Оцена	ЕСПБ
Испитивање трансформатора и пригушница у погону (19Д011ИТП)	10	9
Позитивни ефекти употребе бентонита у системима уземљења (19Д011ПЕБ)	10	9
Електромагнетни прелазни процеси у електроенергетским системима (19Д021ЕПП)	10	9
Енглески језик (19Д091ЕЈ)	10	6
Интеграција електромоторних погона у сложене системе покретања и управљања (19Д011ИЕП)	10	9
Одабрана поглавља из специјалних електричних инсталација (19Д011ОПС)	10	9
Специјална поглавља из електричног осветљења (19Д011СПЕ)	10	9
Математичко моделирање у електротермији (13Д011ММЕ)	10	9
Неуралне мреже (13Д051НМ)	10	9
Метод коначних елемената у електромагнетици (13Д071МКЕ)	10	9
Студијски истраживачки рад I		15
Научно стручни рад		3
Студијски истраживачки рад II		15

Библиографија кандидата:

Категорија M20 – Радови објављени у научним часописима од међународног значаја:

1. **M. Novkovic**, A. Popovic, E. Brioso, R.M. Iglesias, Z. Radakovic, "Dynamic thermal model of liquid-immersed shell-type transformers," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol 142, part B, 2022, paper no. 108347, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108347>. (M21)
2. **M. Novkovic**, Z. Radakovic, F. Torriano, P. Picher, "Proof of the Concept of Detailed Dynamic Thermal-Hydraulic Network Model of Liquid Immersed Power Transformers," *Energies*, vol. 16, no. 9, 2023, paper no. 3808, <https://doi.org/10.3390/en16093808>. (M23)
3. **M. Novkovic**, F. Torriano, P. Picher and Z. Radakovic, "Application of Dynamic Detailed Thermal Hydraulic Model on a Transformer With Zig-Zag Winding Scale Model," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 39, no. 6, pp. 3338-3346, Dec. 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2024.3466297>. (M21)

Категорија M30 – Радови објављени у зборницима конференција од међународног значаја:

4. **M. Novković**, Z. Radaković, „Modernizacija laboratorijskih vežbi iz prenosa toplote za studente elektroenergetike," XVII međunarodni simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2019, rad ENS-2.7 (165), Jahorina, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina, 2019. (M33)

5. Z.Radakovic, **M. Novkovic**, P. Picher, M. Kirouac, F. Torriano, „A Contribution to the Concept of Dynamic Thermal Model of Liquid-Immersed Power Transformers based on detailed Thermal-Hydraulic Network Model,“ CIGRE SC A2 and 6th International Colloquium Transformer research and asset management, PS1 - P7, Split, Hrvatska, Novembar, 2023. (M33)
6. P. Picher, F. Torriano, Z. Radakovic, **M. Novkovic**, „Advancements in dynamic thermal modelling of power transformers: integrating detailed thermal hydraulic network models,“ 2024 CIGRE Paris Session, paper no. 10841, Pariz, Francuska, Avgust, 2024. (M33)

Kategorija M50 – Radovi objavljeni u naučnim časopisima od nacionalnog značaja:

7. **M. Novković**, Z. Radaković, „Algoritam i softver za skraćanje i obradu rezultata tipskog ogleđa zagrevanja uljnih energetskih transformatora,“ *Tehnika – Elektroenergetika*, vol. 75, no. 3, pp. 333-340, 2020, doi: <http://doi.org/10.5937/tehnika2003333N>. (M52)

Kategorija M60 – Radovi objavljeni u zbornicima konferencija od nacionalnog značaja:

8. Z. Radaković, **M. Novković**, U. Radoman, S. Milosavljevic, V. Ostraćanin, R. Todorović, „Procena starenja transformatora na osnovu dijagrama opterećenja, sadržaja vlage u izolacionom sistemu i temperature ambijenta“, 12. Savetovanju o elektrodistributivnim mrežama Srbije sa regionalnim učešćem, rad R-1.17, Vrnjačka Banja, Srbija, 30.8 – 3.9. 2021. (M63)
9. A. Jovanović, **M. Novković**, S. Girard, P. Picher, Z. Radaković, „Primena MQTT protokola u sistemima za monitoring energetskih transformatora,“ 13. Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije sa regionalnim učešćem, R-3.12, Kopaonik, Srbija, Septembar, 2022. (M63)
10. Z. Radaković, **M. Novković**, Z. Lazarević, T. Rajić, D. Kulić, Ž. Lazović, „Maksimalne struje kratkog spoja pri kvarovima na priključcima tronamotajnih transformatora različitih sprega,“ 13. Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije sa regionalnim učešćem, R-1.19, Kopaonik, Srbija, Septembar, 2022. (M63)
11. A. Popović, **M. Novković**, T. Rajić, Z. Radaković, „Softverska realizacija proračunske metode za izračunavanje struja kratkog spoja kroz namotaje transformatora,“ 14. Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije sa regionalnim učešćem, R-1.13, Kopaonik, Srbija, Septembar, 2024.
12. **M. Novković**, P. Picher, F. Torriano, Z. Radaković, „Termički monitoring energetskih uljnih transformatora baziran na primeni detaljnog dinamičkog termo-hidrauličkog modela,“ 14. Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije sa regionalnim učešćem, R-1.14, Kopaonik, Srbija, Septembar, 2024. (M63)

Кандидат је 23. јануара 2025. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду јавно усмено бранио предложену тему докторске дисертације пред Комисијом у саставу:

1. др Младен Терзић, ванредни професор, Електротехнички факултет Универзитета у Београду,
2. др Урош Радоман, научни сарадник, Универзитет у Београду – Институт „Никола Тесла“,
3. др Милета Жарковић, ванредни професор, Електротехнички факултет Универзитета у Београду,
4. др Братислав Иричанин, ванредни професор, Електротехнички факултет Универзитета у Београду,
5. др Мирко Коматина, редовни професор, Машински факултет Универзитета у Београду.

На јавној усменој одбрани предложене теме, Комисија је закључила да је кандидат Марко Новковић добио оцену задовољно и да испуњава потребне услове за рад на предложеној теми докторске дисертације на Електротехничком факултету Универзитета у Београду.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

На основу резултата које је кандидат остварио у свом досадашњем стручном и научном раду, од којих бисмо издвојили следеће:

- сакупио је сто двадесет (120) ЕСПБ (полагањем испита на докторским студијама и испуњењем научно-истраживачких обавеза),
- јавно одбранио тему докторске дисертације 23. јануара 2025. године, пред Комисијом (др Младен Терзић, др Урош Радоман, др Милета Жарковић, др Братислав Иричанин, др Мирко Коматина) формираном од стране Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду на седници број 903, одржаној 14.01.2025. године,
- публиковао укупно дванаест радова, од којих су три публикована у научним часописима од међународног значаја, један у научном часопису од националног значаја, три у зборницима конференција од међународног значаја и пет у зборницима конференција од националног значаја,
- публиковани радови под бројевима 1, 2, 3, 5, 6, 9 и 12 су директно везани за предложену тему докторске дисертације,
- остварио практично искуство у истраживању, сарадњи са привредним партнерима и настави кроз рад на Електротехничком факултету Универзитета у Београду (од 14. децембра 2018. године у звању сарадника у настави, а од 14. децембра 2019. године у звању асистента)

закључујемо да кандидат Марко Новковић испуњава све потребне и довољне услове и поседује неопходне вештине и знања да приступи изради докторске дисертације са предложеном темом.

2. Предмет и циљ истраживања

Предмет докторске дисертације је развој детаљног динамичког термо-хидрауличног модела (DTNМ – енг. *Dynamic Thermal-Hydraulic Network Model*) енергетских уљних трансформатора и његова софтверска реализација, са фокусом на могућност његове примене у реалном времену у системима за мониторинг трансформатора и као помоћ оператерима при доношењу одлука о оптерећивању трансформатора током ванредних ситуација.

Електроенергетски систем (ЕЕС) је под све већим оптерећењем као последицом константног раста потрошње и промене структуре система (повећава се удео дистрибуираних извора и складишта електричне енергије). Због тога одржавање постојеће инфраструктурне опреме која је, по правилу, у погону дуги низ година, постаје све захтевније. Дозвољена времена искључења из погона, зарад одржавања, постају краћа, а периоди између њих дужи. Једна од могућности да се то постигне је да се спроведу анализе чији је резултат дефинисање оптималне стратегије експлоатације и одржавања ЕЕС, за који је неопходно обезбедити безбедно и

поуздано функционисање. Због тога се јавио стратешки интерес за развојем алата и метода за оптимизацију процеса одржавања и праћење стања елемената ЕЕС у реалном времену тзв. прављење дигиталне реплике (енг. *digital twin*).

Енергетски трансформатори (ЕТ) су један од најзначајнијих и најскупљих елемената ЕЕС. Њихова номинална снага дефинише и пропусну моћ целе трансформаторске станице. Номинална снага ЕТ, одређена за случај константног оптерећивања, ограничена је порастом температуре који је последица губитака насталих услед протока електричне струје кроз проводнике и индукованог електромагнетног поља у језгру и металним конструкционим деловима [1]. Једна од основних карактеристика изолационог флуида (уља, које осим изолације служи и као расхладни медијум) и чврсте изолације унутар трансформатора (најчешће базиране на целулози) јесте њихова номинална температура [2] тј. температура при којој изолациони материјал стари номиналном брзином.

Због велике термалне инерције, као и променљиве температуре околине током рада на мрежи, ЕТ је могуће, током краћих временских периода, оптеретити и изнад номиналне вредности. При чему се разликују случајеви дугорочног цикличног и краткотрајног преоптерећења. Краткотрајна преоптерећења могу, такође, бити циклична или ургентна, када у кризним ситуацијама ЕТ треба да преузме оптерећење неког другог ЕТ који је испао из погона. Заједничко за све типове преоптерећења је да се краткотрајно жртвује животни век трансформатора. Током планских преоптерећења ЕТ укупно релативно старење изолације на дужем периоду треба да буде испод јединичног (релативно старење има јединичну вредност при номиналној температури најтоплије тачке изолације (тзв. *hot-spot*), при чему ове вредности зависе од примењене класе изолације, и садржају влаге). Током ургентних преоптерећења може се донети одлука и о жртвовању извесне количине животног века ЕТ. За безбедно преоптерећивање ЕТ потребно је израчунати температуре њихових компоненти током прелазних термичких процеса. Устаљена пракса је да се помоћу динамичких термичких модела израчунавају критичне температуре тј. температуре најтоплије тачке чврсте и течне изолације. Такође, мора се водити рачуна и да температуре конструктивних делова, које могу достићи високе вредности због расутог флукса и изазвати појаву мехурова у изолационом флуиду (овај феномен је веома опасан и може довести до диелектричног пробоја изолације ЕТ), не пређу критичне вредности. Основни стандарди који разматрају овај проблем су IEEE C57.91 [3] и IEC 60076-7 [4]. Други пример практичне примене анализе температура и старења је при доношењу инвестиционе одлуке да ли због пораста вршног оптерећења преко номиналне снаге постојећих ЕТ треба реконструисати трансформаторску станицу.

Уобичајени приступ за израчунавање температура у ЕТ током прелазних термичких процеса, како је описано у поменутим стандардима и у објављеним побољшаним моделима (нпр. модел из Прилога Г у [3] или [5]), јесте решавање скупа од неколико диференцијалних једначина (у наставку овакви модели ће се означавати као ЈМ – једноставни модели), при чему се температуре израчунавају само у неколико карактеристичних тачака (понекад само на две: горње уље (уље у термометарском цепу на врху трансформаторског суда) и најтоплија тачка чврсте изолације). Предност оваких модела је једноставна имплементација и брзо извршавање, што је важно за њихову примену у реалном времену.

Термички и хидраулички феномени у ЕТ су веома сложени, а одређивање температура захтева решавање великог броја нелинеарних диференцијалних једначина које их описују. У приступу да се појаве прикажу једноставним моделима од неколико диференцијалних једначина (ЈМ), потребно је увести радикална поједностављења. Параметри оваких модела се по правилу много мењају у различитим радним условима. Параметри ЈМ могу бити типски (објављени у стандардима за различите типове ЕТ) или одређени експериментално на основу резултата измерених током стандардних (нпр. из [6]) или проширених фабричких огледа загревања, или током погона ЕТ. Пример како је могуће параметризовати један овакав ЈМ, као и проблеми који се могу појавити у овом процесу, приказан је у [7]. Уколико радни услови одступају од оних који су коришћени за параметризацију модела, тачност модела се може значајно смањити.

Развој рачунарских ресурса омогућио је нов приступ моделовању физичких појава применом софтвера базираних на методи коначних елемената (FEM – енг. *Finite Element Method*) и рачунарској динамици флуида (CFD – енг. *Computational Fluid Dynamics*). FEM и CFD описују термичке и хидрауличке појаве са веома високом резолуцијом и тачношћу, пружајући увид и у неке локалне појаве (на пример, локални пад притиска на месту споја два тока уља [8] или коефицијенте преласка топлоте струјањем у каналима за уље [9]). Међутим, овакав приступ захтева велике рачунарске ресурсе, а време потребно за рачунање је много дуже од трајања физичког прелазног топлотног процеса који се симулира, што значи да се ове методе не могу користити у реалном времену, па се не могу користити за доношење одлука о могућем преоптерећењу трансформатора током рада. Као илустрација времена потребног за извршење симулације, у [10] је представљено да је за симулацију понашања термофлуида у експерименталном лабораторијском моделу у трајању од 30 минута било потребно 30 дана за рачунарску симулацију на 464 процесорске јединице. Код примене FEM и CFD постоји и проблем нумеричке конвергенција, при већим температурама уља, када је вискозност много мања, или уколико се моделује и ваздух којим се хладе радијатор или компактни хладњак уље/ваздух.

Нови приступи динамичком моделовању, укључујући моделе редукованог реда (ROM – енг. *Reduced Order Model*) и методе засноване на вештачкој интелигенцији као што су машинско учење (ML– енг. *Machine Learning*) и неуралне мреже (NN– енг. *Neural Networks*), нуде могућност смањења сложености модела који се извршава у реалном времену, уз задржавање тачности рачунања. Ипак, као и у случају JM, тачност ових модела у великој мери зависи од података за обучавање, који се обично добијају симулацијама заснованим на физици (обично FEM/CFD) или мерењима на терену. Проблеми са тачношћу могу се очекивати када су улазни подаци изван опсега података коришћених за обучавање модела.

Као компромис између ова два приступа термичком моделовању намеће се примена детаљног DTHNM. Овај модел заснован је на детаљном опису физичких појава у конкретној конструкцији трансформатора. Применом једнодимензионе конвективно-дифузионе диференцијалне једначине [11] моделују се кључни феномени преноса топлоте, укључујући и расподељену акумулацију топлоте. Детаљни DTHNM одликује значајно већа тачност од JM (мања у односу на FEM/CFD моделе), и прихватљиво време извршења, које омогућава његову „online“ примену. Детаљни DTHNM је сложенији и захтева значајно више времена за имплементацију од JM, али применом стандардних рачунарских ресурса (без примене суперрачунара) могуће је његово извршавање у реалном времену тј. израчунавање промене температура у трансформатору у трајању од једне секунде у реалном времену трајаће мање од једне секунде. Ово је кључна карактеристика, уз задовољавајућу тачност, која детаљни DTHNM квалификује за изградњу практично применљиве верне дигиталне реплике термичког понашања трансформатора на мрежи. Другим речима, DTHNM представља симулатор рада трансформатора на мрежи. Још једна предност детаљног DTHNM у односу на JM или моделе настале применом ROM/ML/NN је да не захтева обуку ни параметризацију. Параметри DTHNM се одређују, аутоматизованим софтверским поступком, заснованим на детаљним подацима о конструкцији трансформатора и карактеристикама примењених материјалима, што није увек доступно (посебно када су у питању старије јединице).

Примена концепта детаљног THNM (енг. *Thermal-Hydraulic Network Model*) није новина у инжењерској пракси [12]. Детаљни THNM за устаљена стања данас постаје стандард у пракси пројектовања ЕТ. Детаљни DTHNM је још увек у фази развоја и није достигао одговарајући ниво технолошке спремности како би ушао у широку примену за мониторинг трансформатора и при доношењу одлука о оптерећивању трансформатора током њихове експлоатације у ЕЕС. Идеја и основни принципи примене динамичког модела базираног на THNM објављени су још 1999. године [13], као и у патенту [14] из 2000. године. Међутим, модел није достигао потребан ниво развоја за реалну примену, док је патент у међувремену истекао. У још једном раду из овог периода [15], разматрана је примена концепта детаљног THNM за развој динамичког модела. Као и у претходном случају, ни овај модел није развијен у потпуности. Након тога,

развој динамичког модела базираног на THNM излази из фокуса истраживања, пре свега због развоја функционалног модела за устаљена стања. У последњих неколико година, са развојем рачунарских ресурса и након успешне примене модела за устаљена стања у пракси, развој динамичког модела поново улази у фокус. Примена поједностављеног модела базираног на THNM приказана је у пилот пројекту објављеном у [16]. Како је описано у [12], детаљни статички THNM заснива се на следећим принципима: а) очување топлоте, б) очување масе и в) равнотежа притисака у затвореним петљама уља. На овим принципима моделује се глобална расподела протока уља кроз трансформатор, као и детаљно у појединачним деловима трансформатора. Као резултат, детаљни THNM даје расподелу температуре уља и чврсте изолације, као и протоке уља кроз најмање структурне елементе унутар делова трансформатора (до нивоа најмањег канала и појединачног проводника у намотајима).

Прелазак са THNM за устаљена стања на DTHNM захтева комплетну промену термичког дела модела како би се, применом једнодимензионе конвективно-дифузионе диференцијалне једначине, описала расподељена акумулација топлоте током прелазног процеса. То значи да је потребно развити потпуно нове методе за прорачун температура свих делова трансформатора (намотаја (за сваки тип намотаја потребно је развити посебну методу), језгра, радијатора, компактних хладњака, бајпаса уља, токова уља изнад и испод намотаја, трансформаторског суда, цеви итд.). Након тога све ове методе је потребно повезати у одговарајућу целину како би обезбедио прорачун температура у целом трансформатору. Хидраулички прорачуни у DTHNM остају исти као у статичком THNM [12], уз додавање компоненте динамичког пада притиска [15] услед промене брзине струјања уља током времена.

Прва имплементација DTHNM на лабораторијску поставку базирану на затвореној термосифонској петљи [17] представљена је у [18]. Овај једноставан експериментални модел послужио је као доказ концепта.

Даља разрада DTHNM за случај цик-цак типа намотаја са верификацијом на примеру лабораторијског модела [10] који је веома сличан реалном трансформатору објављена је у [19, 20]. Верификација модела кроз термичко моделовање реалних трансформатора номиналне снаге 66 MVA и 370 MVA приказана је у [21, 22].

Детаљни DTHNM комбинује предности модела заснованих на физичким законима преноса топлоте и масе унутар конкретне конструкције трансформатора, омогућавајући прецизно одређивање температура уља и чврстих делова трансформатора. Захваљујући примењеном концепту примене једнодимензионе конвективно-дифузионе диференцијалне једначине и мешања уља, и примењеним ефикасним нумеричким поступцима, DTHNM омогућава израчунавања током прелазних топлотних процеса у реалном времену. Остварена реализација DTHNM не само да унапређује тачност и прецизност у израчунавању, већ омогућава и примену модела у реалним оперативним условима, као што су преоптерећења и промена режима хлађења. Због ове флексибилности и ефикасности, детаљни динамички THNM представља квалитативно унапређење у области развоја дигиталних нестационарних термичких реплика (*digital twin*) трансформатора за праћење и управљање у реалном времену.

Циљ истраживања:

Развој динамичког термо-хидрауличког модела (DTHNM) енергетских уљних трансформатора који обезбеђује прецизну симулацију термичких и хидрауличких процеса у реалном времену, са применом у системима за мониторингу, оптимизацији одржавања и подршци при доношењу одлука у ванредним условима преоптерећивања, као и одлукама о инвестицијама када трансформатор улази у радне режиме током којих је подвргнут блажим преоптерећивањима краћег интензитета.

1. Развој модела за извршење у реалном времену: Осигурати да модел омогућава израчунавање температура и протока током прелазних термичких процеса у временском оквиру који је краћи од трајања физичког процеса (да се симулације извршавају брже од реалног времена).

2. Моделовање појединачних делова трансформатора, обухватајући реално примењене конструкције: Развити посебне алгоритме за термичко и хидраулично моделовање различитих делова трансформатора (намотаји (различитих типова, као што су цик-цак, са радијалним каналима, без радијалних канала), језгро, радијатори и компактни хладњаци, уље изнад и испод намотаја, бајпас уља, цеви и трансформаторски суд).
3. Интеграција компоненти у јединствени модел: Ујединити развијене алгоритме за различите делове трансформатора у јединствени DTHNM који може симулирати свеобухватно понашање трансформатора.
4. Оптимизација модела за различите радне услове: Осигурати да модел функционише са високом тачношћу у широком опсегу радних услова (промене режима хлађења, краткотрајна и дуготрајна преоптерећења, екстремни опсег температуре амбијента).
5. Софтверска имплементација: Реализовати модел у програмском језику C# са графичким корисничким интерфејсом.

Значај истраживања:

1. Унапређење поузданости електроенергетских система: Развој детаљног DTHNM ће омогућити прецизно праћење и контролу термичког стања трансформатора, што је од посебног интереса у случајевима када је трансформатор оптерећен близу или преко номиналног оптерећења. Тиме се смањује ризик од отказа трансформатора и бројних неповољних техничких и економских последица.
2. Оптимизација инвестиционих и трошкова одржавања: Модел ће помоћи при доношењу одлука да ли током одржавања треба вршити обраду уља (пре свега сушење, јер влага утиче на интензитет старења). Одлука о инвестиционим улагањима се пре свега односи на одлуку да ли треба набавити нови трансформатор (исте или веће снаге).
3. Примена у ванредним ситуацијама: У случајевима када један или више трансформатора морају преузети оптерећење другог који је испао из погона, DTHNM ће омогућити да се изврши провера безбедности преоптерећења и оптимизује уклопно стање како би се постигао минимални губитак животног века расположивих трансформатора.
4. Развој дигиталне реплике трансформатора (*digital twin*): DTHNM ће служити као основа за развој дигиталних реплика које ће омогућити термички мониторинг и праћење старења трансформатора у реалном времену, симулацију различитих сценарија оптерећења и дугорочно планирање експлоатације.
5. Подршка за прелазак на паметне мреже (*smart grids*): DTHNM ће омогућити интеграцију са напредним системима управљања активном и реактивном снагом у паметним мрежама, са обновљивим изворима енергије, складиштењем енергије, и управљаном потрошњом, који имају јасан тренд великог раста.

Кључне предности у односу на постојеће моделе:

1. Већа тачност од ЈМ уз задржавање могућности за извршење у реалном времену.
2. Нема потребе за обуком модела или његовом параметризацијом на бази мерење током фабричких тестова или у експлоатацији, што чини модел директно применљивим.
3. Модуларан структуриран дизајн који омогућава примену на различите практичне конструкције трансформатора и оперативне услове (примера ради, промена врсте хлађења и, у случају принудног струјања ваздуха, потребан број активних вентилатора).

Базна литература

- [1] S.V. Kulkarni, S.A. Khaparde, *Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics*, 2nd ed. Boca Paton, FL, USA, CRC Press, 2012.
- [2] Electrical insulation – Thermal evaluation and designation, IEC Standard 60085, 2007.
- [3] IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators, IEEE Standard C57.91-2011, 2012.

- [4] Power transformers – Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers, IEC Standard 60076-7, 2018.
- [5] Z. Radakovic, K. Feser, “A new Method for the calculation of the hot-spot temperature in power transformers with ONAN cooling,” *IEEE Trans. on Power Deliv.*, vol. 18, no. 4, pp. 1284-1292, Oct. 2003, doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.817740>.
- [6] Power transformers – Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers, IEC Standard 60076-2, 2011.
- [7] M. Novkovic, A. Popovic, E. Brioso, R. M. Iglesias, Z. Radakovic, “Dynamic thermal model of liquid-immersed shell-type transformers,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol 142, part B, 2022, papar no. 108347, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108347>.
- [8] W. Wu, Z. Wang, A. Revell, P. Jarman, “Computational fluid dynamics calibration for network modelling of transformer cooling flows - Part II: Pressure loss at junction nodes,” *IET Electr. Power Appl.*, vol. 6, no. 1, pp. 28-34, Jan. 2012, doi: <http://dx.doi.org/10.1049/iet-epa.2011.0005>.
- [9] W. Wu, Z. Wang, A. Revell, H. Iacovides, P. Jarman, “Computational fluid dynamics calibration for network modelling of transformer cooling oil flows - Part I heat transfer in oil ducts,” *IET Electr. Power Appl.*, vol. 6, no. 1, pp. 19-27, Jan. 2012, doi: <http://dx.doi.org/10.1049/iet-epa.2011.0004>.
- [10] F. Torriano, H. Campelo, M. Quintela, P. Labbé, P. Picher, “Numerical and experimental thermofluid investigation of different disc-type power transformer winding arrangements,” *Int J Heat Fluid Flow*, vol. 69, pp. 62–72, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2017.11.007>.
- [11] S.V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, 1st ed; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1980.
- [12] Z. Radakovic, M. Sorgic, “Basics of Detailed Thermal-Hydraulic Model for Thermal Design of Oil Power Transformers,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, no. 2, pp. 790–802, Apr. 2010, doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2033076>.
- [13] W. Seitlinger, “A thermo-hydraulic transformer model,” Proceedings of the Conference of electrical power supply industry (CEPSI), Manila, Philippines, 2000.
- [14] W. Seitlinger, “Method and arrangement for ascertaining state variables,” US Patent 6609079B1. May, 6, 1999.
- [15] W. Van der Veken, J. Declercq, M. Baelmans, S. Van Mileghem, “New perspectives to overloading with accurate modeling of thermal transients in oil-immersed power transformers,” Proceedings of the 2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing New Perspectives (Cat. No. 01CH37294), Atlanta, GA, USA, 2001, pp. 147–152, doi: <https://doi.org/10.1109/TDC.2001.971225>.
- [16] J. Raith, F. Belavic, J. Gaugl, “A digital twin for a dynamic prediction of maximal permissible transformer overloads,” CIGRE A2 Colloquium & ICTRAM, Split, Hrvatska, 2023.
- [17] I. Lokhmanets, B.R. Baliga, “Experimental investigation of steady and transient operations of a single-phase closed-loop vertical thermosyphon,” *Int. J. Therm. Sci.* vol. 145, id 105988, Nov. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.105988>.
- [18] M. Novkovic, Z. Radakovic, F. Torriano, P. Picher, “Proof of the Concept of Detailed Dynamic Thermal-Hydraulic Network Model of Liquid Immersed Power Transformers,” *Energies*, vol. 16, no. 9, Apr. 2023, Art. no. 3808, doi: <https://doi.org/10.3390/en16093808>.
- [19] Radakovic, M. Novkovic, P. Picher, M. Kirouac, F. Torriano, “A Contribution to the Concept of Dynamic Thermal Model of Liquid-Immersed Power Transformers based on detailed Thermal-Hydraulic Network Model”, CIGRE A2 Colloquium & ICTRAM, Split, Hrvatska, 2023.
- [20] M. Novkovic, F. Torriano, P. Picher, Z. Radakovic, “Application of Dynamic Detailed Thermal Hydraulic Model on a Transformer With Zig-Zag Winding Scale Model,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 39, no. 6, pp. 3338-3346, Dec. 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2024.3466297>.
- [21] P. Picher, F. Torriano, Z. Radakovic, M. Novkovic, “Advancements in dynamic thermal modelling of power transformers: integrating detailed thermal hydraulic network models”, 2024 CIGRE Paris Session, Pariz, Francuska, Avgust 2024.
- [22] M. Novkovic, P. Picher, F. Torriano, Z. Radakovic, “Termički monitoring energetskih uljnih transformatora baziran na primeni detaljnog dinamičkog termo-hidrauličkog modela,” 14.

3. Полазне хипотезе

1. Тренутни једноставни модели (JM) и модели засновани на машинском учењу (ROM/ML/NN) не могу обезбедити конзистентно тачне резултате у целокупном опсегу радних услова трансформатора, што доводи до ограничења у њиховој примени у критичним ситуацијама.
2. Напредне методе као што су метод коначних елемената (FEM) и рачунарска динамика флуида (CFD) обезбеђују високу прецизност, али њихова временска и рачунарска захтевност онемогућава њихову примену у реалном времену.
3. Проширењем принципа THNM за устаљена стања, који је данас стандардна инжењерска пракса, могуће је израдити DTHNM тако да се моделују и прелазне термички процеси.
4. DTHNM може обезбедити високу прецизност и брзину извршавања, што га чини погодним за реалне апликације.
5. Различити делови трансформатора (различити типови намотаја, језгро, радијатори, компактни хладњаци, бајпас уља, токови уља изнад и испод намотаја, трансформаторски суд, цеви итд.) захтевају посебне моделе, чијом разрадом се могу моделовати карактеристичне појаве код различитих конструкција које се примењују код сваког од ових делова.
6. Повезивање појединачних компоненти у јединствен модел (DTHNM) обезбедиће симулацију понашања комплетног трансформатора конкретне конструкције при различитим радним условима.
7. Развој DTHNM омогућава његову примену не само за мониторинг и планирање преоптерећења већ и за дугорочно праћење стања и одржавање.

4. Научне методе истраживања

1. Анализа постојећих решења: Истраживање тренутно доступних модела и идентификација њихових ограничења у погледу тачности и могућности примене у реалном времену.
2. Развој DTHNM: Увођење нових једначина које описују локалне термичке и хидрауличке процесе. Ово укључује:
 - а. Развој нових метода за термичке прорачуне базиране на примени једнодимензионе конвективно-дифузионе диференцијалне једначине са граничним условима и једначине мешања струјница уља различитих протока и температура.
 - б. Модификација метода за хидрауличке прорачуне у THNM за устаљена стања увођењем динамичке компоненте пада притиска.
 - с. Развој алгоритма којим би се методе за сваки од делова трансформатора повезале у јединствен модел којим се описује понашање трансформатора током прелазних термичких процеса.
3. Оптимизација нумеричких метода и кода како би се постигло његово извршавање у реалном времену.
4. Експериментална верификација у три корака: а) На бази резултата огледа на упрошћеном моделу објављених у литератури, б) Извођење огледа на лабораторијском моделу са стварном конфигурацијом цик-цак типа трансформаторског намотаја. в) На бази мерења на реалним трансформаторима: током рада трофазног трансформатора снаге 66 MVA на мрежи и мерења на монофазном трансформатору снаге 370 MVA током проширеног фабричког огледа загревања.

5. Очекивани научни допринос

1. Развој унапређеног JM из IEC стандарда за монофазни тронамотајни shell type трансформатор снаге 100 MVA са диригованим струјањем уља користећи мерења на трансформатору током огледа загревања и у погону на хидроелектрани Salto Grande у Уругвају.
2. Развој новог динамичког модела којим је могуће израчунавање промене температуре и протока у току једне секунде рачунарском симулацијом која траје мање од секунде.
3. Развој динамичког модела чија је тачност и ниво информација које даје значајно већи од постојећих једноставних динамичких модела који се данас примењују у пракси и доминирају у стандардима и литератури.
4. Развој динамичког модела који не захтева обуку или параметризацију на бази мерења.
5. Развој динамичког модела који је модуларан и омогућава симулацију конфигурација трансформатора које се примењују у производњи (различити типови изолационих течности, различити типови намотаја, различити типови расхладне опреме, различите геометрије језгра, промена радних стања (позиција регулационе преклопке, укључење/искључење појединачних пумпи и вентилатора)), као и при различитим амбијенталним условима, укључујући и екстремно ниске температуре амбијента.
6. Развој дигиталне реплике термичког понашања трансформатора током рада на мрежи. Дигитална реплика омогућава побољшање система за мониторинг и алгорита предвиђања понашања при потенцијалним преоптерећењима, чиме се повећава поузданост електроенергетског система и помаже у оптимизацији његовог одржавања и планирања инвестиција реконструкције трансформаторске станице.
7. Обезбеђивање алата за генерисање скупа података за обуку других модела (ROM/ML/NN).

6. План истраживања и структура рада

1. Анализа литературе, постојећих стандарда и доступних софтверских алата.
2. Развој нових метода и алгоритама за различите конструкције делова трансформатора и њихова софтверска реализација у C#.
3. Интеграција развијених софтверских модула у јединствени DTNNM и његова софтверска реализација.
4. Доказ концепта примене DTNNM на једноставној лабораторијској поставци базираној на затвореној термосифонској петљи из поређење са резултатима мерења објављеним у литератури.
5. Извођење експеримената на лабораторијској поставци са стварном конфигурацијом цикл-цак типа трансформаторског намотаја. Примена DTNNM на лабораторијску поставку и симулација изведених експеримената. Верификација модела кроз поређење са резултатима експеримената.
6. Примена DTNNM на два реална трансформатора снага 66 MVA (трофазни) и 370 MVA (монофазни) и верификација кроз поређење са резултатима мерења.
7. Писање дисертације и објављивање резултата у релевантним часописима.

7. Закључак и предлог

Предложена докторска дисертација кандидата Марка Новковића представља актуелну и значајну научну тему у области енергетских трансформатора. Детаљни динамички термо-хидраулички модел енергетских уљних трансформатора, својом тачношћу и могућношћу извршавања у реалном времену, представља оптимално решење за изградњу верне дигиталне реплике термичког понашања трансформатора током рада на мрежи, чијом се применом може

остварити економска оптимизација, уз одржавање поузданости електроенергетског система, као и оптимизовати процес одржавања и побољшати процес одлучивања током инцидентних ситуација у мрежи.

На основу приложене документације и непосредног увида у досадашњи научни рад кандидата Марка Новковића, 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 Универзитета у Београду за израду докторске дисертације.

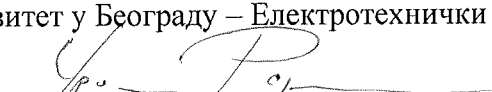
2. Предложена тема **„Развој детаљног динамичког термо-хидрауличког модела енергетских уљних трансформатора“** (енг. *Development of Detailed Dynamic Thermal-Hydraulic Model of Oil-immersed Power Transformers*) је научно заснована, а резултати до којих ће се доћи израдом ове дисертације представљаће значајан и оригиналан допринос. Тема припада научној области Техничке науке – Електротехника, ужа научна област Енергетски претварачи и погони, подобласт Енергетски трансформатори. Комисија је предложила промену наслова у односу на иницијално предложени у **„Детаљни динамички термо-хидраулички модел енергетских уљних трансформатора“**.

На основу претходно изложеног, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да кандидату Марку Новковићу одобри израду докторске дисертације под насловом **„Детаљни динамички термо-хидраулички модел енергетских уљних трансформатора“** (енг. *Detailed Dynamic Thermal-Hydraulic Model of Oil-immersed Power Transformers*), а за ментора предлаже др Зорана Радаковића, редовног професора Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

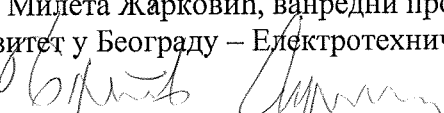
У Београду 27.01.2025.

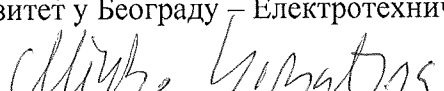
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ


др Миладен Терзић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Урош Радоман, научни сарадник
Универзитет у Београду – Институт „Никола Тесла“


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


др Братислав Ирићанин, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Мирко Коматина, редовни професор
Универзитет у Београду – Машински факултет