

DOI: [10.46793/CIGRE37.A2.07](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.A2.07)**A2.07****DIGITALNI BLIZANAC ENERGETSKOG ULJNOG TRANSFORMATORA – PRIKAZ
KONCEPTA I DEMONSTRACIONE VERZIJE DT SISTEMA****DIGITAL TWIN OF A OIL-IMMERSED POWER TRANSFORMER – CONCEPT
OVERVIEW AND DEMONSTRATION VERSION OF THE DT SYSTEM****Uroš Radoman*, Petar Nikolić, Filip Kilibarda, Vladimir Polužanski, Nenad Kartalović,
Nikola Miladinović, Valentina Vasović, Branko Pejović, Aleksandar Žigić, Jelena Lukić****Kratak sadržaj:**

U radu je predstavljen koncept digitalnog blizanca (digital twin, DT) energetskog uljnog transformatora (EUT) koji predstavlja osnovu za razvoj alata za nadzor, dijagnostiku i optimizaciju eksploatacije, zasnovanog na principima četvrte industrijske revolucije. Dati koncept je fokusiran na modularnost sistema koja je postignuta korišćenjem mikroservisa. Mikroservisi omogućavaju postepeno proširivanje sistema i primenu kako jednostavnih, tako i složenih modela u realnim uslovima. Praktična primena koncepta, ilustrovana je formiranjem demonstracionog DT sistema za praćenje ključnih fizičkih procesa kao što su promene temperature, efikasnost hlađenja i starenje izolacije usled termičkog naprezanja. Demonstracioni sistem simulira rad u realnom vremenu, uz korišćenje arhiviranih pogonskih podataka. Sistem integriše modele zasnovane na fizici (physics-based) i modele zasnovane na upotrebi metoda veštačke inteligencije (AI), kao i module za vizuelizaciju i servisne funkcije. Prikazani koncept ukazuje na potencijal DT tehnologije za pomoć u donošenju odluka, optimizaciju procesa prediktivnog održavanja, kao i na mogućnosti daljeg razvoja i integracije sa postojećim sistemima u elektroenergetici.

Ključne reči: Energetski uljni transformatori, Digitalni blizanac, Industrija 4.0, Monitoring sistemi, Starenje izolacije, Zaprljanje razmenjivača toplote, Mikroservisi, Veštačka inteligencija, Prediktivno održavanje

* Uroš Radoman, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, uros.radoman@ieent.org
Petar Nikolić, EPS AD Beograd Ogranak Đerdap Kladovo, petar.m.nikolic@eps.rs
Filip Kilibarda, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, filip.kilibarda@ieent.org
Vladimir Polužanski, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, vladimir.poluzanski@ieent.org
Nenad Kartalović, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, nenad.kartal@ieent.org
Nikola Miladinović, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, nidzo@ieent.org
Valentina Vasović, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, valentina.vasovic@ieent.org
Branko Pejović, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, branko.pejovic@ieent.org
Aleksandar Žigić, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, azigic@ieent.org
Jelena Lukić, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, lukicjelena@ieent.org

Abstract: This paper presents the concept of a Digital Twin (DT) for an oil-immersed power transformer (OIPT), which serves as the foundation for developing tools for monitoring, diagnostics, and exploitation optimization, based on the principles of the Fourth Industrial Revolution. The proposed concept emphasizes system modularity, achieved by the use of microservices. Microservices enable the gradual expansion of the system and the application of both simple and complex models under realistic conditions. The practical application of the concept is illustrated through the development of a demonstration DT system for monitoring key physical processes such as temperature change, cooling efficiency, and insulation thermal aging. The demonstration system simulates real-time operation using archived operational data. It integrates physics-based and artificial intelligence (AI) models, along with visualization modules and service functions. The presented concept highlights the potential of DT technology to support decision-making, predictive maintenance optimization, and allows further development and integration with existing power system infrastructures.

Key words: *Liquid-immersed power transformers, Digital twin, Industry 4.0, Monitoring systems, Insulation aging, Heat exchanger fouling, Microservices, Artificial intelligence, Predictive maintenance*

1 UVOD

Pred elektroenergetske sisteme je, pored glavnog prioriteta obezbeđivanja sigurnog snabdevanja električnom energijom, postavljen ambiciozan zahtev ispunjenja „3D“ platforme koja podrazumeva digitalizaciju, dekarbonizaciju i decentralizaciju. Put ka ostvarenju zacrtanih ciljeva je uvođenje tekovina četvrte industrijske revolucije (Industrije 4.0) u elektroenergetiku. Iako su pojedini elementi neophodni za razvoj i praktičnu primenu novih tehnologija već odavno dostupni i u funkciji, elektroenergetika je dugo kasnila za nekim drugim granama industrije zbog konzervativnosti koju duguje svojoj veličini i ulozi koju ima u modernom društvu [1]. Ubrzani razvoj računarskih i komunikacionih sistema, senzora i monitoring sistema, pad cene i povećanje dostupnosti komponenti, kao i proliferacija data centara, dali su vetar u leđa i otvorili nove mogućnosti za razvoj industrije primenom koncepta interneta stvari (Internet of Things – IOT i njegove industrijske varijante Industrial Internet of Things – IIoT).

U slučaju elektroenergetskog sistema, radi se o ogromnom sistemu čiji pojedinačni podsystemi, delovi i oprema predstavljaju svetove za sebe, ali koji imaju veliki međusobni uticaj. Iako je smart-grid koncept odavno poznat [2], sveobuhvatna rešenja koja u sebi sadrže detaljne modele pojedinačnih delova mreže na nivou sistema su još uvek nedostižan cilj, te je fokus istraživanja usmeren na razvoj detaljnih modela pojedinačnih elementa elektroenergetskih sistema.

Veliki energetski uljni transformatori (EUT) su jedan od najvažnijih uređaja u elektroenergetskim sistemima. Oni su veoma skupi uređaji, ali indirektni troškovi prouzrokovani nepredviđenim zastojima zbog njihovog kvara ili ispada iz pogona mogu značajno premašiti njihovu cenu. Poznavanje stanja EUT ključno je za operatore kako bi se osiguralo njihovo optimalno korišćenje.

Jedan obećavajući koncept koji predstavlja rešenje navedenih izazova je digitalni blizanac EUT [1][3]. Digitalni blizanac uređaja predstavlja njegovu virtuelnu repliku koju čini skup digitalnih modela, povezanih sa realnim sistemom putem senzorskih i komunikacionih veza [4][5]. Uloga digitalnog blizanca transformatora je višestruka: on omogućava kontinuirani nadzor i pravovremeno otkrivanje potencijalnih problema (monitoring i sistem ranog upozoravanja), zatim omogućava izvođenje simulacija složenih ili retko posmatranih stanja koja nisu lako

dostupna u realnoj eksploataciji, kao i podršku pri planiranju održavanja na osnovu stvarnog stanja uređaja i prediktivnih modela.

U radu je predstavljen koncept jednog sistema zasnovan na modularnoj microservice platformi. Ovakav koncept omogućava brži i distribuirani razvoj pojedinačnih komponenti sistema – fizičkih/AI modela, servisnih, komunikacionih i drugih modula. Sistem je još u ranoj fazi razvoja, nalazi se na lokalnim računarima, i trenutno uključuje tri osnovna modela: modifikaciju termičkog modela predstavljenog u IEC standardu [6], model zaprljanosti hladnjaka [7] sa AI modulom za predikciju promene stanja, kao i model starenja izolacije [8]. Prikupljanjem i upotrebom podataka koji predstavljaju izlaze ovih modela formira se osnova za složenije funkcionalnosti sistema, kao što su predikcija stanja hladnjaka, procena relativnog starenja izolacije i planiranje održavanja, uključujući i optimizaciju trenutka čišćenja rashladnog sistema.

Rad se fokusira na ranu fazu razvoja i testiranja sistema, sa ciljem da se kroz nekoliko ilustracija korisničkog interfejsa i dijagrama arhitekture demonstrira njegova funkcionalnost u kontrolisanim uslovima, uz identifikaciju ključnih oblasti za dalji razvoj i unapređenje.

U poglavlju 2 izložene su osnovne ideje koncepta, prednosti koje pruža pristup preko mikroservisa, predlog arhitekture DT EUT sistema i njegovih pojedinačnih modula.

Poglavlje 3 sadrži prezentaciju demo DT EUT sistema kroz ilustraciju rešenja praktičnog problema procene promena termičkih parametara tokom rada EUT i njihovog uticaja na smanjenje maksimalnog trajno dozvoljenog opterećenja (tj. prave maksimalne dozvoljene snage) EUT i njegovo relativno starenje.

2 PREDLOG ARHITEKTURE SISTEMA DIGITALNOG BLIZANCA ENERGETSKOG TRANSFORMATORA

Sistem Digitalnog blizanca uljnog transformatora je organizovan u obliku mikroservis arhitekture.

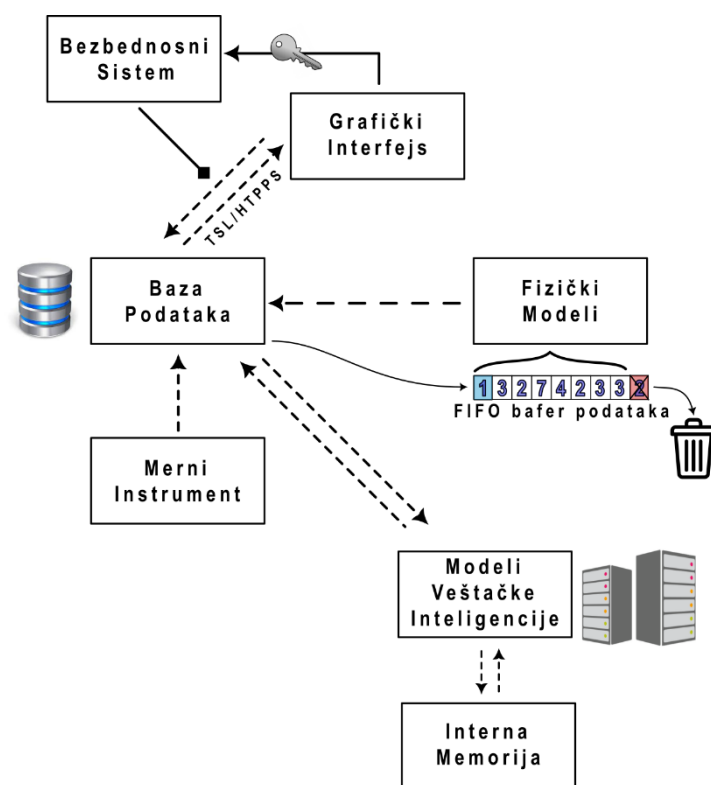
Glavne odlike ovakvih sistema je da je celina sačinjena od kolekcije potprograma/servisa koji su povezani „labavim“ vezama preko nekih jednostavnijih protokola (HTTP/REST, WebSockets) [9][10].

Ovaj princip nudi mnoge prednosti u odnosu na monolitne sisteme. Svi servisi mogu da budu nezavisno razvijani, što unapređuje modularnost. Ovo je isto ključno za životni ciklus softvera, gde se prevazilazi razvijanje po „vodopad“ modelu (linearni model razvoja softvera) i prelazi na „agilni“ razvoj [11] i iterativne metodologije. Sistemi i aplikacije moraju biti prilagođeni radu sa podacima različite složenosti i obima, kao i potrebama korisnika koji se kreću od pojedinaca do velikih organizacija. Zbog toga je prilagodljivost i mogućnost skaliranja jedna od njihovih ključnih karakteristika (Docker/Kubernetes). Kao dodatna prednost ovakvih sistema je da potprogrami/servisi mogu da budu napisani u raznim programski jezicima i okruženjima, što omogućava lakšu kolaboraciju stručnjaka iz različitih programskih jezika. Naravno, osim prednosti, ovakvi sistemi imaju i mane koje su sadržane u tome da su inicijalni razvoj, dizajn arhitekture i održavanje infrastrukture komplikovaniji nego u monolitnim strukturama.

Aplikacije ovog tipa mogu da budu podeljene u module i celine u skladu sa zakonskim i poslovnim zahtevima koje program mora da zadovoljava. Često za modelovanje infrastrukture

od kritičnog značaja, podaci moraju da budu skladišteni lokalno i da im je ograničen pristup, dok se za procesuiranje određenih matematičkih formalizama ili korišćenje metoda veštačke inteligencije često koriste računski centri. Ovakav pristup je omogućen zahvaljujući tome što su komponente sistema međusobno povezane na fleksibilan način, korišćenjem jednostavnih protokola za komunikaciju. Zbog toga se mogu nalaziti na različitim lokacijama – od lokalnih računara, preko udaljenih uređaja, pa sve do cloud okruženja.

Za potrebe naše aplikacije smo odabrali Docker kao sistem za implementaciju sistema. Docker je platforma otvorenog koda (open-source) koja omogućava pakovanje aplikacija i njihovih zavisnosti u kontejnere. Kontejner je kompaktno, samostalno i prenosivo okruženje koje sadrži sve što je potrebno da aplikacija funkcioniše: kod, biblioteke, sistemske alate i podešavanja. Svaki potprogram radi u zasebnom Docker kontejneru, koji je izolovan od ostalih (osim komunikacije preko jednostavnih protokola). Uz prethodno nabrojane prednosti, Docker omogućava da se sve potrebne biblioteke zajedno sa aplikacijom upakuju u kontejner koji može da radi i na Windows i na Linux mašinama, što omogućava portabilnost. Takođe je bitno napomenuti dalju integraciju Docker kontejnera u Kubernetes ekosistem za upravljanjem ovih kontejnera. Ovo omogućava automatsko definisanje infrastrukture potrebne za izvršavanje, kao i skaliranje resursa ako potrebe sistema porastu. Arhitektura sistema DT EUT predstavljena je na slici 1.

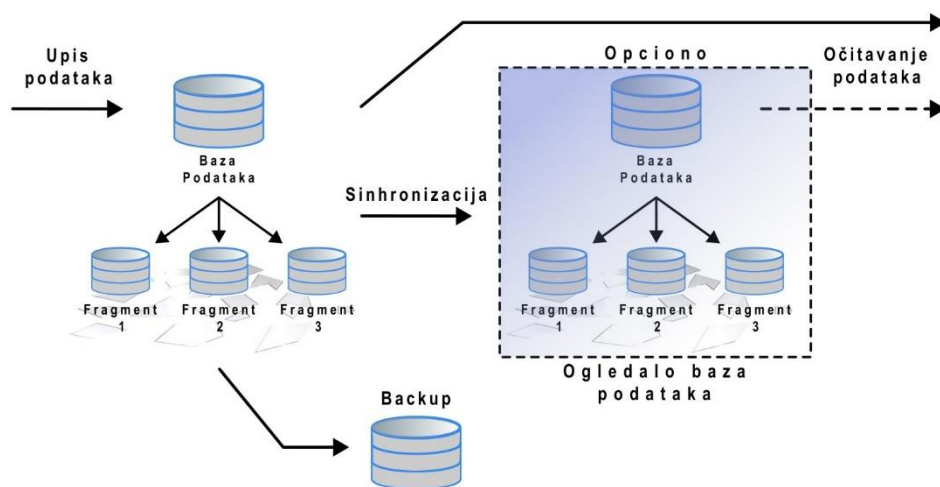


Slika 1: Predlog arhitekture DT sistema

U okviru sistema, moguće je identifikovati 5 različitih kategorija modula.

Prva kategorija su moduli za pribavljanje podataka, kao i za njihovu početnu predobradu i strukturisanje. Ovi moduli konvertuju ulazne podatke u predefinisanu formu koja odgovara bazi, uklanjaju nedostajuće, oštećene, loše i nepotpune podatke (null, NaN, inf i slične) i usklađuju vremensku kvantizaciju različitih ulaznih podataka.

Druga kategorija su moduli za skladištenje podataka. Praktično su osnovni element sistema i komuniciraju sa svim ostalim celinama. Da bi se efikasno skladištile velike količine podataka i omogućilo da sistem nezavisno prati promene na više mernih sistema i celina, optimalno je da se podaci ne upisuju u jednu veliku bazu podataka, već da je za svaki merni sistem organizovana namenska podbaza ili fragment (slika 2). Ovo isto smanjuje mogućnosti kvara i oštećenje (korupciju) informacije, uz dodatne mogućnosti kontrole pristupa i izolovanosti informacija u zavisnosti od nivoa pristupa korisnika. U cilju dalje sigurnosti čuvanja podataka je preporučljivo da se organizuju i kopije baza koje se koriste kao backup, a dodatno ako je potrebno upisivati i čitati ogromne količine podataka i organizovati sistem ogledala baza podataka (eng. mirror DB, takođe predstavljena na slici 2), koje čine logički razdvojene baze podataka, ali sa istim podacima. Na ovaj način bi se u jednu bazu samo upisivalo, a iz druge čitalo, dok se sinhronizacija izvršava internim komandama.



Slika 2: Fragmentiranje baze podataka

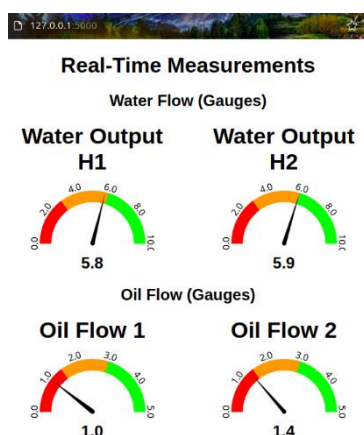
Treća kategorija su moduli koji sadrže simulacione modele zasnovane na fizičkim jednačinama i modele zasnovane na veštačkoj inteligenciji.

Sistemi DT često rade sa vremenskim serijama. Pri izboru metoda veštačke inteligencije za analizu i obradu podataka ovog tipa, u literaturi se najčešće koriste rekurentne neuronske mreže, kao što su GRU [12] i LSTM [13]. Iako su se ove metode pokazale kao odlične za ceo spektar problema u energetici [14][15] kao i različitim oblastima nauke i društva, one imaju i mane. Jedna od najznačajnijih je da rekurentne neuronske mreže ne mogu efikasno da se paralelizuju (rekurentnost - budući ulaz zavisi od prethodnog izlaza), sto može dovesti do problema ako imamo veliki broj podataka ili ako je potrebno brzo izvršavanje. Zbog ovoga je poželjno koristiti i novije tipove neuronskih mreža, kao što su transformeri [16]. Kao primer upotrebe veštačke inteligencije, u poglavlju 3 biće prikazan modul za predikciju zaprljanja razmenjivača toplote transformatora.

Isto tako, dok su klasične baze podataka pogodne za sigurno skladištenje strukturisanih podataka, one nisu sasvim pogodne za direktnu interakciju sa modelima mašinskog učenja i veštačke inteligencije. Stoga je potrebno dodati još jedan tip memorije u sistem (Interna memorija). Ovo može biti i fizička memorija (SSD, RAM), ali može biti i samo logički drugačije organizovana celina (vektorske baze podataka, baferi, objektno i blokovo skladištenje...). Ovo omogućava visoke brzine sekvencijalnog čitanja, upisivanja i komunikacije (GPU/CPU), kao i mogućnosti paralelne obrade podataka.

Pored prikupljanja kvalitetnih podataka i uspostavljanjem veze sa modulima za njihovu analizu i proračune, jako je važno omogućiti pristup i interakciju sa korisnicima, pa su četvrta kategorija GUI moduli (korisnički interfejs). Da bi se omogućila standardizacija, kao i da bi ovaj deo bio sistem-agnostičan on je najčešće u obliku web servisa i njemu se pristupa uz pomoću internet pretraživača (primer dat na slici 3). Ovde je bitno napomenuti da iako ovaj deo u zavisnosti od potreba i definicija, može da bude omogućen samo na lokalnom kompjuteru, on isto tako može da bude omogućen i na lokalnoj mreži ali i van nje.

I poslednja komponenta, o kojoj se verovatno najmanje govori iako je cela inženjerska (i ne samo inženjerska) javnost upoznata sa ključnom ulogom koju ona ima, je sistem za kontrolu sigurnosti podataka i pristupa sistemu. Iako on ne mora da postoji od početka rada sistema, on mora da bude jasno struktuirisan i njegova interakcija sa ostalim modulima mora da bude jasno definisana.



Slika 3: Primer jednostavnog web-servis interfejsa

3 PRAKTIČNA PRIMENA PREDLOŽENE ARHITEKTURE – STARENJE TRANSFORMATORA U ZAVISNOSTI OD PROMENLJIVIH RADNIH PARAMETARA

U ovom poglavlju, na primeru jednog ODWF blok transformatora, biće demonstriran koncept DT i mogućnosti koje on pruža. Posmatrani transformator je opremljen velikim brojem savremenih monitoring sistema i lokalnom bazom podataka u koju se skladište podaci sa monitoring sistema. Transformator ima razmenjivače toplote ulje-voda tipa shell-and-tube. Kao što je to i uobičajeno na hidroelektranama, kao spoljašnji rashladni fluid u razmenjivačima toplote koristi se rečna voda. Korišćenjem hemijski i biološki netretirane rečne vode, zaprljanje unutrašnje (vodene) strane cevi shell-and-tube hladnjaka je veoma važan proces, koji ima značajan uticaj na rashladnu snagu razmenjivača toplote, samim tim i na temperaturu EUT, što efektivno smanjuje nominalnu snagu uređaja i utiče dinamiku starenja čvrste celulozne izolacije namotaja.

Između ostalih, dostupna su bila merenja:

- temperature ambijenta,
- temperature ulja na ulasku i izlasku iz razmenjivača toplote (RT),
- temperature vode na ulasku i izlasku iz RT,
- zapreminske protoke ulja i vode kroz RT,
- napone tri faze visokonaponskog namotaja,
- struje tri faze visokonaponskog namotaja,

- struje tri faze niskonaponskih namotaja,
- sadržaja vlage u ulju i
- direktna merenja temperature namotaja F.O. senzorima.

Takođe, bili su dostupni podaci o intervencijama i pogonskim događajima (kao što su periodi remonta, zastoji u radu, operacije na ventilima sistema za dovod vode itd.).

Za potrebe proračuna temperature ulja i najviše temperature namotaja, korišćen je modifikovan jednostavni IEC model energetskog uljnog transformatora [6]. Modifikacija uzima u obzir da je posmatrani EUT tronamotajni – dva niskonaponska primara su postavljena aksijalno jedan u odnosu na drugi. Korišćeni su pravi termički parametri transformatora, određeni u ogledu grejanja (HRT) i na osnovu merenih podataka iz pogona.

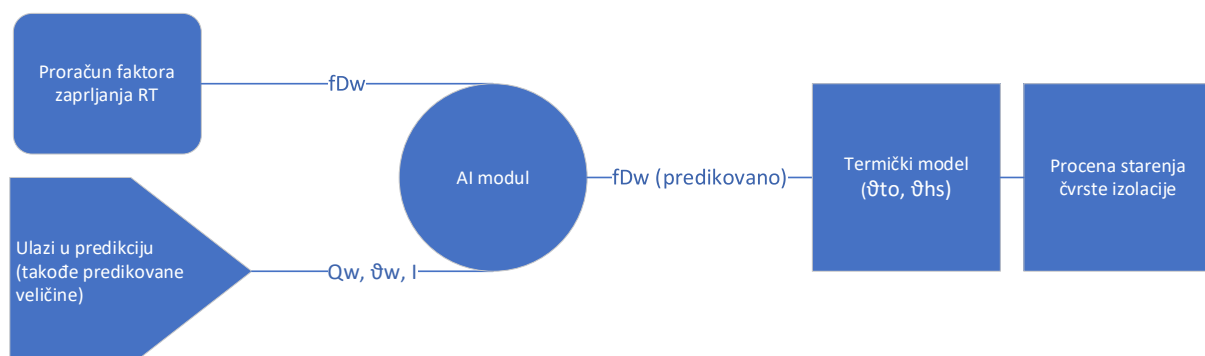
Raspodela gubitaka u namotajima i ostalim delovima transformatora određena je na osnovu FEM simulacija, i preračunava se iterativno, na osnovu trenutne srednje temperature namotaja i strujnog opterećenja.

Jedna od osnovnih prednosti upotrebe DT sistema je prepoznavanje tzv. „new normal“ („novog normalnog“) stanja u radu fizičkog uređaja. U konkretnom primeru, pažnja je usmerena na degradaciju efikasnosti rashladnog sistema tokom eksploatacije, tj. na zaprljanje razmenjivača toplote. Upotreba modela zaprljanja razmenjivača toplote ulje-voda ODWF EUT tipa shell-and-tube je prikazana u [7]. Model je zasnovan na hibridnom dinamičkom-kvazistacionarnom termo-hidrauličkom modelu razmenjivača toplote, koji, na osnovu standardnih merenja u realnom vremenu određuje vrednost faktora zaprljanja razmenjivača toplote (f_{Dw}). Ova veličina predstavlja fiktivni (dodatni) toplotni otpor prenosu toplote sa ulja na vodu.

Procena promene f_{Dw} u budućnosti vrši se upotrebom AI modela. Ulazi u AI modul su temperatura i protok vode koji se procenjuju iz istorijskih podataka, dok se promena opterećenja planira za posmatrani period.

Procena brzine relativnog starenja u realnom vremenu, njegova predikcija u budućnosti pri definisanim uslovima eksploatacije kao i preostalog životnog veka uređaja je jako koristan podatak – otvara se mogućnost upotrebe modula za optimizaciju trenutka čišćenja i za procenu sposobnosti (pre)opterećivanja transformatora. Postoji potencijal i za razvoj modula koji, u zadatim radnim uslovima, optimizuje nivo proizvodnje električne energije balansiranjem između dugoročnih gubitaka izazvanih habanjem opreme i promenljivih tržišnih cena električne energije.

Na slici 4. predstavljen je tok podataka za konkretan primer. Potrebno je imati u vidu da je ovo samo logička ilustracija, dok se, u stvarnosti, razmena podataka između pojedinačnih modula ostvaruje kroz bazu podataka, na upit pojedinačnog modula.



Slika 4: Logički flowchart demo sistema

Za proračunatu promenu faktora zaprljanja za neki prethodni period, i za procenjenu/zadatu promenu ulaznih parametara (protok i temperaturu ulazne vode i strujno opterećenje sva 3 namotaja), izvršena je procena promene faktora zaprljanja u budućnosti AI modulom.

Za potrebe predviđanja zaprljanja (koja je u formi vremenske serije), kao što je navedeno u poglavlju 2, pogodna je upotreba novijih tipova neuronskih mreža, kao što su transformeri. Na slici 5 je dat šematski prikaz transformera zasnovanog samo na enkoderima, koji je korišćen za predviđanje zaprljanja hladnjaka transformatora, gde su:

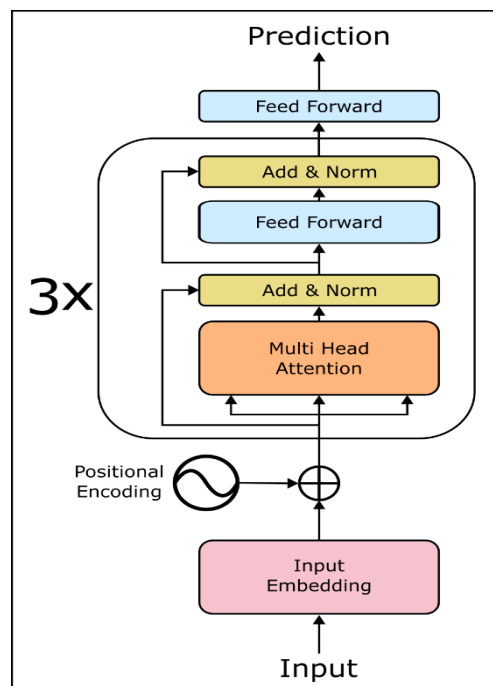
Input Embedding - transformiše ulazne podatke u vektore više dimenzije. Ovo omogućava veću izražajnost modela i učenje složenijih obrazaca ponašanja, kao i bolji rad neuronskih mreža. Isto tako, transformacija u višedimenzionalne prostore omogućava da model nauči da slične obrasce ponašanja prikazuje kao bliske vektore u višedimenzionalnom prostoru.

Positional Encoding - pošto model ne poseduje intristički način da detektuje redosled elemenata u vremenskoj seriji (za LSTM je to rekurentnost), potrebno je na neki način dodati informaciju o redosledu u vektorsku reprezentaciju podataka. Ovo se najčešće postiže dodavanjem sinusno-kosinusnih funkcija koje zavise od pozicije na vektor koji sadrži ulazne podatke.

Multi-Head Attention - predstavlja mehanizam koji omogućava uočavanje veza i odnosa između različitih komponenti vektora.

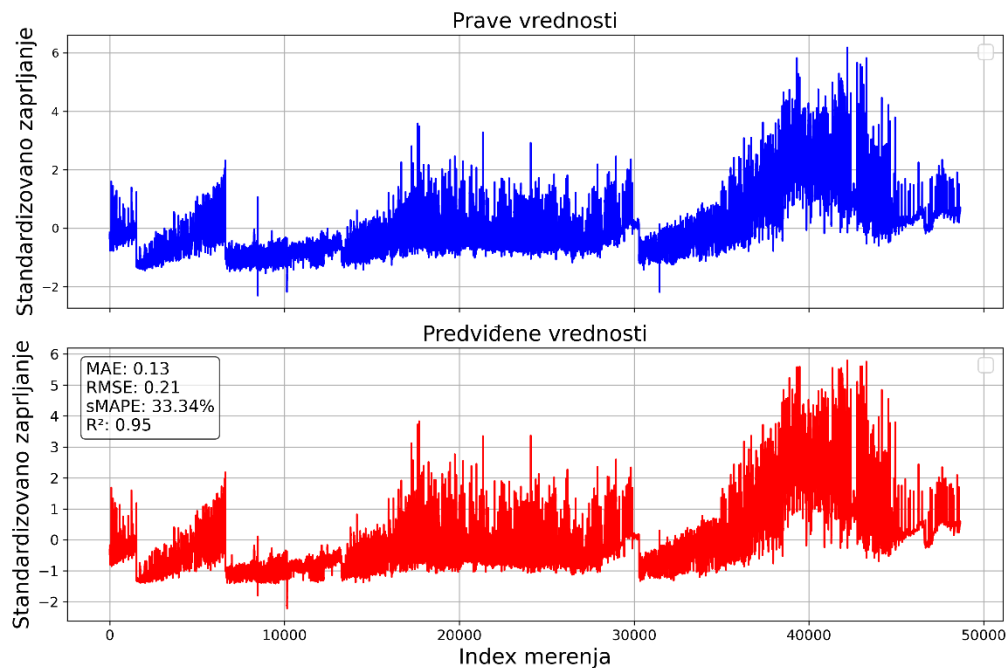
Add & Norm - sloj čine dve komponente. Prvo se sabiraju dva signala (vektora) (izlaz prethodnog sloja, i ulaz prethodnog sloja), pa se onda ovaj signal normalizuje. Ovo je jako bitno da bi se model efektivno obučavao, pošto prisustvo rezidualne veze (ulaz prethodnog sloja) olakšavaju propagaciju gradijenata pri obučavanju modela i ubrzavaju konvergenciju.

Feed Forward - sloj je sastavljen od perceptrona i on omogućava linearne transformacije vektora uz kombinaciju sa nelinearnostima koje se modeluju aktivacionim funkcijama.

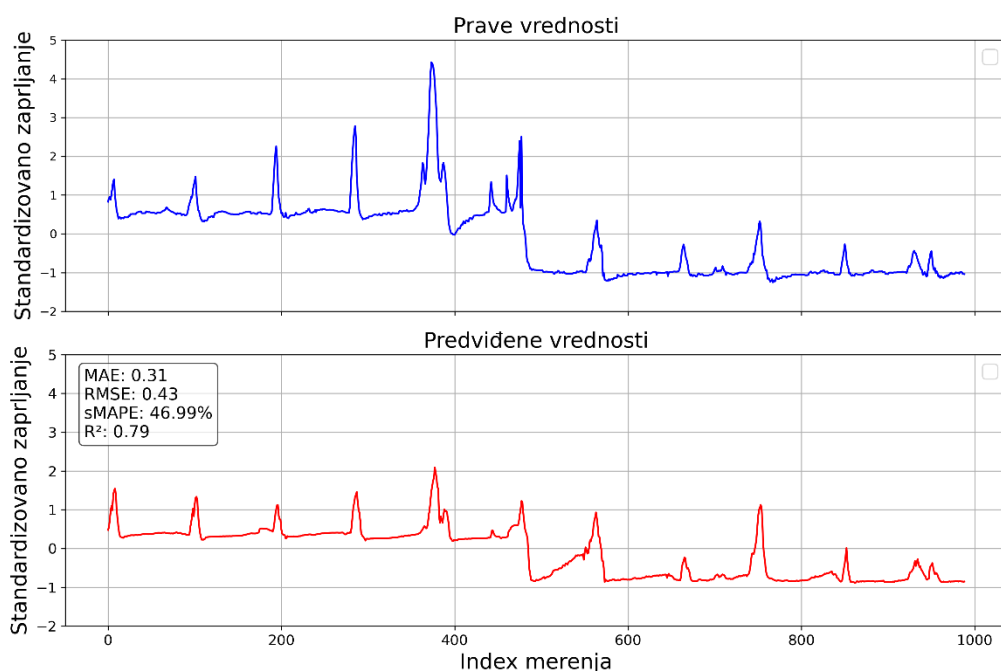


Slika 5: Principijelna šema transformera zasnovanog na enkoderima

Transformer je obučen na podacima sa jednog transformatora, koji je posmatran u dva vremenska perioda da bi se obuhvatila što veća raznolikost pojava i podataka. Ova dva seta podataka su nadovezana jedan na drugi i korišćena za treniranje (1000 iteracija optimizacije, slika 6). Isto tako, deo podataka je bio izdvojen iz početnog skupa podataka kao test skup podataka (koji nije korišćen za obučavanje) i na njemu je provereno koliko dobro naš model opisuje nove podatke (slika 7).



Slika 6: Ulazna vrednost faktora zaprljanja i vrednosti određene upotrebom AI modula za set podataka za obučavanje

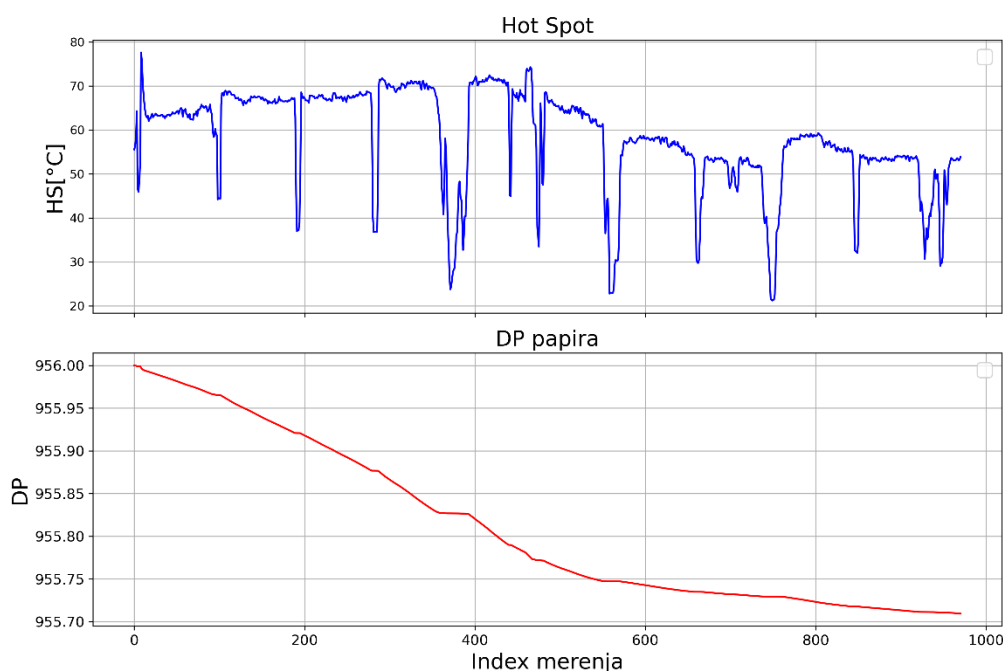


Slika 7: Predviđena promena faktora zaprljanja u budućnosti upotrebom AI modula

Vidljivo je da inicijalni model generalno dobro opisuje trendove. Iako ne postiže uvek iste apsolutne vrednosti, promenom hiperparametara i dodatnim obučavanjem model može dodatno da se generalizuje (da postoji manja razlika između performansi na setu za treniranje i testiranje). Isto tako, performanse sistema bi bile dodatno unapređene sa treniranjem na dodatnim setovima podataka. Osim toga, uvek je najbolje praviti poređenja sa drugim metodama, ili dodatno prikazati rezultate dobijene drugim metodama. Ovo generalno čini sistem robusnijim. Modularnost sistema čini ovo vrlo lakim za implementaciju, pa je moguće dodati i evaluatore zasnovane na LSTM mrežama, kao i na 1D-CNN [17] mrežama.

Zatim se, upotrebom termičkog modela određuje hot-spot temperatura namotaja i inkrement gubitka korisnog životnog veka čvrste izolacije (izražen u DP), kako je ilustrovano na slici 8.

Uporedna upotreba modela zasnovanih na fizičkim jednačinama i AI modelima, tačnije na dobrom balansu između ova dva, komplementarna, pristupa ima dve važne prednosti. Prva je da se izbegava ponavljanje grešaka iz prošlosti i AI metode se koriste tamo gde su zaista potrebne i gde daju svoj maksimalni doprinos, čime se smanjuje kompleksnost modela, povećava njihova efikasnost i univerzalnost. Druga je da se na ovaj način povećava transparentnost modela čime se postiže nivo poverenja koje korisnik ima u sistem.



Slika 8: Predviđena promena hot-spot temperature i vrednosti DP čvrste izolacije

4 ZAKLJUČAK

U radu je predstavljen jedan koncept sistema zasnovanog na tehnologijama četvrte industrijske revolucije – digitalnom blizancu energetske uljne transformatora. Koncept je zasnovan na modernoj microservice arhitekturi koja omogućava distribuirani razvoj pojedinačnih modula sistema. Ovo omogućava lakšu integraciju ovih modula za čiji razvoj je neophodan multidisciplinarni pristup, tj. rad većeg broja eksperata iz različitih oblasti.

Pored koncepta, ilustrovan je rad demonstracionog sistema zasnovanog na DT tehnologiji kroz praktičan primer i upotrebu većeg broja relativno jednostavnih modula. Ilustrovana je istovremena upotreba i modela zasnovanih na zakonima fizike (physics-based) i AI modela, nakon čega je ukazana potreba za razvojem ovakvih, hibridnih, rešenja i prednost koju ona donose.

Predloženi koncept predstavlja osnovu za dalji razvoj pojedinačnih modula, ali i unapređenje samog koncepta kroz praćenje i odgovor na napredovanje state-of-the-art tehnologija (savremenih arhitekturnih rešenja, baza podataka, novih bezbednosnih standarda, senzora, edge jedinica itd.) i mogućnosti koje one pružaju.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržalo Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije kroz Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada NIO u 2024. godini (broj ugovora 451-03-136/2025-03).

5 REFERENCE

- [1] U. Radoman, F. Kilibarda, N. Kartalović, N. Miladinović, V. Polužanski, V. Vasović, B. Pejović, A. Žigić, and J. Lukić, "Digitalni blizanac (Digital Twin) energetske uljne

transformatora - koncept i primena,” Zbornik radova, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, vol. 34, pp. 61-82, 2024, doi: 10.5937/zeint34-54654

- [2] Congress.gov. "H.R.6 - 110th Congress (2007-2008): Energy Independence and Security Act of 2007." December 19, 2007. <https://www.congress.gov/bill/110th-congress/house-bill/6>.
- [3] P. Picher, A. Alber, S. Zhao, Z. Wang, S. Chakraborty, S. Voss, M. Ryadi, T. McGrail, and N. S. Momtazi, „Transformer digital twin – concept and future perspectives”, in *Colloquium A2 - Split 2023*, MC&NT_01.
- [4] M. Grieves, *Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products Through Product Lifecycle Management*. 2011.
- [5] ISO/IEC, International Standard, ISO/IEC 30173, Digital twin - Concepts and terminology. 2023.
- [6] IEC, International Standard, IEC 60076-7 Power transformers - Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers. 2018.
- [7] U Radoman, Z. Radaković, A. Jovanović, P. Nikolić „Metoda za procenu opterećenosti transformatora usled zaprljanja shell-and-tube kompaktnih hladnjaka,” in 33 savetovanje Cigre Srbija, Zlatibor, 2017.
- [8] V. Vasovic, J. Lukic, D. Mihajlovic, B. Pejovic, M. Milovanovic, U. Radoman and Z. Radakovic, „Aging of Transformer Insulation of Experimental Transformers and Laboratory Models with Different Moisture Contents: Part II – Moisture Distribution and Aging Kinetics,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 26, no. 6, pp. 1847-1852, 2019.
- [9] R. Rodger. *The tao of microservices*. Simon and Schuster, 2017.
- [10] S. Newman. *Building microservices: designing fine-grained systems*. O'Reilly Media, Inc., 2021.
- [11] C. Larman. *Agile and iterative development: a manager's guide*. Addison-Wesley Professional, 2004.
- [12] Chung, Junyoung, et al. „Empirical evaluation of gated recurrent neural networks on sequence modeling.” *arXiv preprint arXiv:1412.3555* (2014).
- [13] S. Hochreiter, and J. Schmidhuber. „Long short-term memory.” *Neural computation*, vol. 9, issue 8, pp. 1735-1780, 1997.
- [14] D. L. Marino, K. Amarasinghe and M. Manic, „Building energy load forecasting using Deep Neural Networks,” *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, Italy, 2016, pp. 7046-7051, doi: 10.1109/IECON.2016.7793413.

- [15] A. Vatsa, A.S. Hati, P. Kumar et al. „Residual LSTM-based short duration forecasting of polarization current for effective assessment of transformers insulation.“ Sci Rep vol 14, pp. 1369, 2024. doi: 10.1038/s41598-023-50641-z
- [16] A. Vaswani, et al. „Attention is all you need.“ Advances in neural information processing systems, vol 30, 2017. doi: 10.48550/arXiv.1706.03762
- [17] S. Kiranyaz, et al. „1D convolutional neural networks and applications: A survey.“ Mechanical systems and signal processing, vol. 151, pp. 107398, 2021, doi: 10.1016/j.ymssp.2020.107398