

Digitalni blizanac (Digital Twin) energetskih uljnih transformatora – koncept i primena

Uroš Radoman¹, Filip Kilibarda¹, Nenad Kartalović¹, Nikola Miladinović¹, Vladimir Polužanski¹, Valentina Vasović¹, Branko Pejović¹, Aleksandar Žigić¹, Jelena Lukić¹

¹Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Koste Glavinića 8a, 11000 Beograd, Srbija

uros.radoman@ieent.org

Kratak sadržaj: U ovom radu izvršen je pregled literature i utvrđen je state-of-the-art koncepta i primene tehnologije digitalnih blizanaca (Digital Twin – DT) na energetske transformatore. Uvodna poglavlja rada posvećena su, još uvek fluidnoj, definiciji i univerzalnim konceptima DT nezavisno od polja primene, kao i ciljevima Industrije 4.0 i tehnologija koje omogućavaju digitalnu transformaciju industrije. Posebna pažnja posvećena je specifičnostima elektroenergetske industrije, s naglaskom na specifične zahteve koje priroda i značaj energetskih uljnih transformatora postavljaju kao osnovu za razvoj sistema zasnovanih na DT tehnologijama.

Ključne reči: digitalni blizanac, energetski uljni transformatori, pregled literature, industrija 4.0, digitalna transformacija

1 Uvod

Poslednjih godina postaje očigledna transformacija u industriji, vođena tzv. četvrtom industrijskom revolucijom [1] (Industry 4.0). Cilj ove revolucije jeste postizanje sve većeg prisustva informacionih tehnologija u industrijskim procesima. Glavni pokretač industrije 4.0 je ubrzan razvoj informaciono-komunikacionih sistema koji je omogućio povezivanje različitih uređaja i alata i na tome zasnovanu automatizaciju rada. Cena integracije ovakvih sistema u realne procese je drastično pala, kao posledica masovne proizvodnje. Osim toga, evidentan je i veliki napredak u proizvodnji senzora i čipova za merenje, nadgledanje i kontrolu proizvodnih sistema. Senzori su postali sveprisutni i

kontrola procesa je nezamisliva bez njih. Razvoj ekonomičnih senzora i čipova značajno je doprineo pojavi Interneta Stvari (Internet of Things, IoT) i industrijskog IoT (IIoT) – mreža u kojima uređaji i mašine komuniciraju i skupljaju podatke bez potrebe za ljudskom intervencijom. Masovno prikupljanje podataka sa ovih uređaja je omogućilo njihovu dalju analizu i nastojanja da se to dalje iskoristi za unapređenje i optimizaciju proizvodnih procesa. Ova ogromna količina podataka je dala potpuno novu dimenziju u oblastima analitike podataka i nauke o podacima (Data Science). Konačno, napredak u oblasti veštačke inteligencije omogućio je primenu novih ali i već postojećih AI metoda u tradicionalnim oblastima (poput elektroenergetike).

Zbog svoje uloge i ogromne vrednosti postojeće infrastrukture, u poređenju sa ostalim granama industrije elektroenergetski sistemi (EES) spadaju među konzervativnije sisteme. Stoga pojedini pristupi uobičajeni u drugim industrijama sporije pronalaze primenu u EES. Međutim, poslednjih godina, zbog sve većeg prisustva obnovljivih izvora energije i drugih nepostojanih (volatile) izvora, dolazi do promene uslova i strategije eksploatacije EES i njegovih objekata.

Ubrzani razvoj senzora, sistema akvizicije i skladištenja podataka, kao i višedecenijska akumulacija iskustva sa kapitalnom elektroenergetskom opremom i razvojem (digitalnih) modela, omogućavaju razvoj naprednih tehnologija za nadzor, zaštitu i upravljanje opremom (Asset Management).

Veliki energetske transformatori (ET) spadaju u najkapitalnije objekte u EES. Radi se o uređajima velikih gabarita i visoke cene. Karakteriše ih dug period nabavke, što dodatno podiže njihovu vrednost, jer treba imati u vidu i finansijske gubitke koji nastaju kada proizvodni sistemi rade sa smanjenim kapacitetom ili su kompletno van pogona. Stoga je poznavanje stanja uređaja neophodno, kao i njihovo adekvatno i pravovremeno održavanje. Potreba za razvojem sistema nadzora, dijagnostike i upravljanja ovim uređajima postaje sve izraženija, dok se prediktivno održavanje sve češće navodi kao glavni cilj u bliskoj budućnosti. U ovom trenutku, prediktivno održavanje elektroenergetske opreme još uvek nije standard. I pored velikog interesovanja struke i akademske zajednice u prošlosti, ova tema je tek sada postala vrlo aktuelna.

Jedan veoma perspektivan pristup nadzoru, dijagnostici i optimalnom iskorišćenju opreme, koji se zasniva na tehnologijama Industrije 4.0, naziva se Digitalni blizanac (Digital Twin – DT). Praktično, DT predstavlja sistem, skup hardvera i softvera, različitih metoda i modela kojima je realan, fizički, sistem predstavljen u digitalnoj formi, pri čemu se kao njegov sastavni deo podrazumevaju i sistemi komunikacije i razmene podataka između fizičkog i digitalnog entiteta.

U ovom radu prikazan je koncept i primena tehnologije DT kao i mogućnosti primene u oblasti energetske uljne transformatora (EUT). U poglavlju 2 izvršen je pregled različitih definicija i koncepta DT. U poglavlju 3 navedene su tehnologije i tehnike koje su omogućile razvoj DT, i pri tome je opisana njihova uloga u DT sistemima. U poglavlju 4. i 5. izvršen je pregled

trenutnog stanja tehnike DT u elektroprivredi i analizirane su mogućnosti primene DT tehnologije za optimizaciju nadzora i održavanja ET.

2 Digitalni bliznac – definicije i koncepti

2.1 Definicija digitalnog blizanca

Definicija pojma DT je već dugo vremena predmet akademske polemike. Neformalno, termin "Digital Twin" prvi put je upotrebio Michael Grieves 2003. godine. Gotovo deceniju kasnije, termin se pojavljuje u knjizi istog autora [2], koji je zatim objavio i White Paper [3] u kojima su prvi put definisani koncept i pojam DT. Po definiciji koju je on predložio (takozvani 3D DT) DT čine 1) fizički entitet, 2) virtualni entitet i 3) veze između fizičkog i virtualnog entiteta kojima se prenose podaci i informacije.

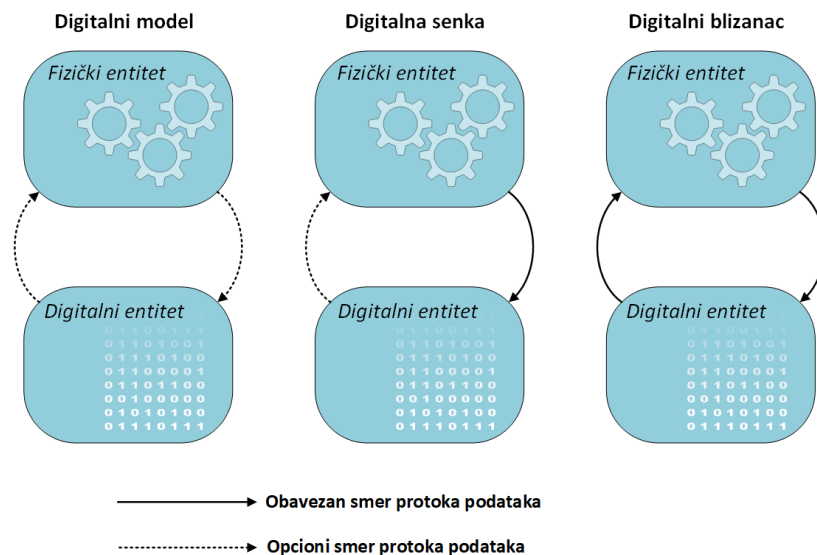
Kako su se koncept digitalnog blizanca i prapratne tehnologije razvijali, tako je i definicija menjana i dopunjavana. U literaturi možemo pronaći različite tipove i definicije digitalnog blizanca. Kako se radilo o novom konceptu, opšteprihvaćena definicija dugo nije postojala.

U početku, pod DT često se podrazumevao skup modela zasnovanih na fizici (Physics-Based Models, PBM), čiji su parametri određivani merenjima na fizičkom sistemu i pomoću podataka iz dokumentacije koja je korišćena pri izradi datog entiteta. Pri tome, u toku rada ovakvog sistema promena parametara modela je moguća, ali u opštem slučaju nije automatizovana.

Grupa autora je ispred američke svemirske agencije NASA, kao jedne od najuticajnijih svetskih organizacija u različitim oblastima nauke i tehnike, objavila pionirski članak [4] u kojem je postavljen obrazac primene i integracije najsavremenijih fizičkih modela i statističkih modela u složene multidisciplinarne (multiphysics) sisteme. Primena ovih modela omogućava simulaciju rada sistema u slučaju kada laboratorijska ispitivanja nisu moguća.

Imajući u vidu definiciju iz [3], većina autora danas smatra da je (automatska) razmena podataka između virtualnog (digitalnog) i pravog (fizičkog) entiteta upravo ključna razlika između "prostog" skupa digitalnih modela i digitalnog blizanca. U [5] i [6] naglašena je razlika između tri naizgled veoma slična koncepta (Slika 1). Razlika između tri koncepta je u smeru protoka informacija i podataka između digitalnog i fizičkog entiteta. U opštem slučaju, ovo ne podrazumeva jednokratni manuelni prenos podataka. Protokom podataka se naziva kontinualna, automatska, razmena podataka u realnom vremenu. Ukoliko ne postoji automatski prenos podataka između fizičkog i digitalnog entiteta, reč je o digitalnom modelu (ili skupu digitalnih modela). Ukoliko postoji jednosmeran automatski protok podataka, u smeru od fizičkog

entiteta, ka digitalnom entitetu, reč je o “digitalnoj senci” (Digital Shadow). Samo ukoliko postoji bidirekcionni protok podataka, smatra se da je pomenuti sistem digitalni bliznac. Međutim, u [6] autori sva tri koncepta nazivaju “različitim nivoima integracije (implementacije) DT”. U [5] naglašeno je da je automatski protok u smeru od digitalnog ka fizičkom entitetu neophodan u upravljačkim aplikacijama (kontrola), iako je naglašena neophodnost podređivanja ovih informacija sistemima monitoringa i drugih kontrolnih softvera. U kontrolnim aplikacijama, primena DT omogućava korisnicima modela da zadate željene karakteristike proslede digitalnom entitetu za koje modeli u digitalnom domenu određuju optimalne parametre koje zadovoljavaju ove karakteristike. Primenom ove povratne veze, optimalni parametri se prosleđuju sistemu za kontrolu fizičkog entiteta. Sa druge strane, ukoliko se DT sistem koristi kao pomoćnik (asistent) u donošenju odluka (npr. prediktivno održavanje), u šemu na Slici 1 se mora uključiti i čovek, čime se formalno prekida automatski prenos podataka u smeru ka fizičkom entitetu, ali autori smatraju da se koncept i dalje smatra digitalnim blizancem. Ovde postoje određena neslaganja, jer se uloga i značaj eksperata (različitih profila) u zavisnosti od oblasti primene DT i od faze njenog razvoja i primene mogu veoma razlikovati. U oblasti elektroenergetike eksperti imaju važnu ulogu u svim fazama razvoja, implementacije i eksploatacije. Uloga eksperta je da usmerava obučavanje i unapređuje modele u skladu sa novim zapažanjima i saznanjima.



Slika 1. Prikaz različitog načina protoka podataka između fizičkih i digitalnih entiteta

Pored pomenutih, brojni drugi autori su davali svoje predloge definicija DT. Neki su ukazivali na kvalitativne razlike koje pristup preko DT donosi u odnosu

na tradicionalne pristupe, npr. u [7] kao osnovna karakteristika DT navedena je mogućnost kontinualnog prilagođavanja digitalnog entiteta trenutnom stanju fizičkog entiteta. Drugi su se bavili formalno strukturom – u [8], kao alternativa Grivsovom 3D modelu, predložen je takozvani 5D model, koji pored fizičkog entiteta čine i virtualni modeli, servisi, DT podaci i konekcije između fizičkog entiteta, virtualnih modela, servisa i podataka.

Struka je prepoznala potrebu za jedinstvenom definicijom. Prošle godine, Međunarodna Elektrotehnička Komisija IEC usvojila je osnovni standard Digital twin – Concepts and terminology [9], kao i standard Internet of thing (IoT) – Digital twin – Use cases [10]. Prvi standard uvodi terminologiju, sadrži definiciju i ilustruje koncept, dok drugi daje pregled različitih oblasti primene DT tehnologije sa osvrtom na neke specifičnosti pojedinačnih oblasti.

Definicija u standardu [9] u skladu je sa Grivsovim 3D modelom:

Digital twin: “*digital representation of a target entity with data connections that enable convergence between the physical and digital states at an appropriate rate of synchronization*”,

gde su:

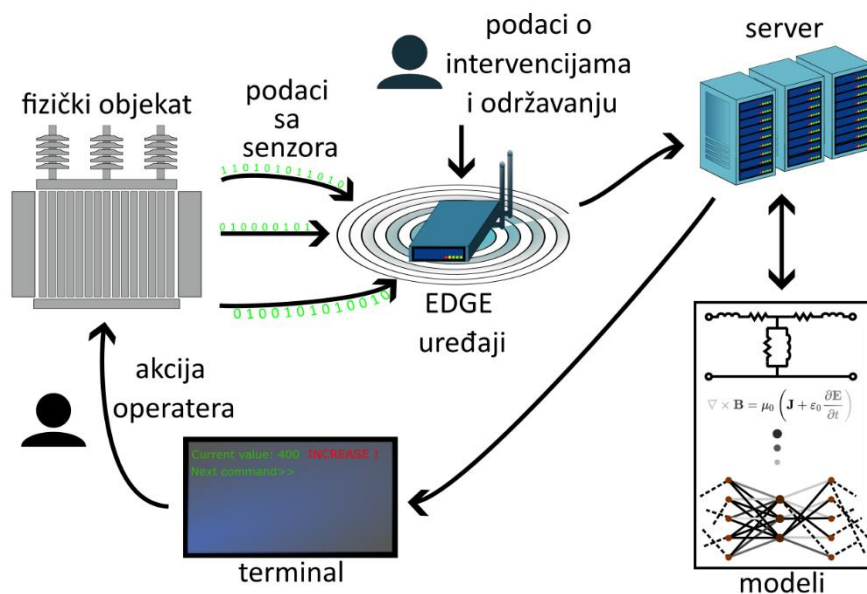
Digital representation: “*digital entity representing either a set of properties or behaviors or both of one or more observable elements*”,

Target entity: “*entity providing a functional purpose in reality which is the subject of digital representation*”,

Entity: “*<digital twin> thing (physical or non-physical) having a distinct existence*”.

2.2 Koncept digitalnog blizanca

Na Slici 2 prikazana je strukturna šema sistema digitalnog blizanca. Sistem možemo podeliti na pet osnovnih celina: senzore, sistem za akviziciju podataka, sistem komunikacije, sistem za modelovanje, kao i sistem za vizualizaciju i korisnički interfejs. Da bi smo započeli modelovanje fizičkog sistema, prvo moramo da definišemo ulazne veličine modela, kao i metode akvizicije. Uopšteno, prikupljanje podataka se vrši upotrebom senzora kao i unosom tabelarnih podataka o izradi datog objekta, pred-istoriji objekta, podacima o održavanju, kao i osobenostima sistema koje su zapažene od strane korisnika sistema. Dalje se ovi podaci digitalizuju, filtriraju, obrađuju i prosleđuju na server sistemima za akviziciju podataka. Zbog tehničkih ograničenja kanala komunikacije, skladištenja kao i brzine izvršavanja (u realnom vremenu), da bi se to postiglo uglavnom se koristi EDGE [11],[12] računarstvo i uređaji. EDGE sistemi nam omogućavaju da velike količine podataka sa senzora analiziramo, odstranimo šum i dalje prosledimo samo smislene podatke. Alternativno, u slučaju većih i komplikovanijih sistema, sa više EDGE podjedinica, možemo govoriti i o FOG računarstvu i sistemima [13].



Slika 2. Dijagram predloženog sistema digitalnog blizanca za monitoring i kontrolu

Isto, ne manje bitno, ponekad je važno da senzori imaju malu potrošnju električne energije i da mogu autonomno da rade u dužem vremenskom periodu. Ovi kanali isto nude galvanjsku razdvojenost između senzora i sistema za akviziciju. Alternativno, možemo koristiti i žične sisteme, ili ako nam je bitna brzina podataka, kao i opto-galvanska izolovanost sistema, možemo koristiti optička vlakna. Za komunikaciju između EDGE uređaja i servera, kao i između servera i sistema za vizualizaciju i interfejs uglavnom koristimo standardne IT tehnologije koje uključuju i optičku komunikaciju. Isto je bitno napomenuti da često podaci koje prenosimo imaju i poverljive ili osetljive karakteristike, pa je bitno imati na umu i sigurnost podataka u transportu među jedinicama, kao i sigurnost u skladištenju. Imajući ovo u vidu, jasno je da ne možemo koristiti standardna komercijalna Cloud rešenja (poput Amazon Web Services, Microsoft Azure i sličnih platformi), već lokalne Cloud servise koji ispunjavaju bezbednosne zahteve. Da bi sistem bio robustan i otporan moramo posvetiti posebnu pažnju na njegovu arhitekturu. [16] Sistem za modelovanje uglavnom predstavlja skup modela, kao i hardver i softver potreban za modelovanje i upotrebu modela. Na modele ćemo se još osvrnuti u drugim delovima teksta (poglavlje 2.3), dok se za hardverske potrebe hibridnih modela i simulacija uglavnom koriste, procesori, grafički akceleratori, jedinice za tenzorske operacije (TPU), pa sve do specifičnih FPGA i ASIC rešenja. Sistem za vizualizaciju i interfejs prikazuje numeričke rezultate dobijene iz digitalnog modela na način koji je prikladan za razumevanje i analizu od strane operatera sistema, dok preko korisničkog interfejsa, korisnici mogu kontrolisati kako ponašanje modela, tako i fizičkog objekta koji modelujemo. U praksi se

kontrolni zahtevi sa servera prosleđuju na lokalni terminal, gde osoblje može posle provere da odobri ponuđene komande za promenu stanja na sistemu, ili poništi ako smatra da promena nije primerna ili trenutno nije preporučljiva.

Na ovaj način se postiže povratna sprega koja je potrebna da bi sistema bio digitalni blizanac, ili po strožem kriterijumu bar zadovoljavao deo ove definicije.

Bitno je napomenuti da ako se obrati pažnja na serversku jedinicu sa šeme, ona ima ulogu koordinatora i kontrolera za ove sisteme. Isto tako server možemo svrstati i kao sistem za komunikaciju(koordinator), sistem za akviziciju (skladištenje i usmeravanje podataka, kao i neke operacije nad podacima) kao i deo sistema za modelovanje i korisničke operacije.

Još jedan veoma važan aspekt DT sistema je bezbednost. U pojedinim oblastima gde je distribuirani pristup podacima (Cloud) jedan od ključnih problema je potreba za povećanom bezbednosti podataka [17].

Pored bezbednosti, značajan aspekt DT sistema je pouzdanost. Podaci prikupljeni sa IoT sistema ili dobijeni odgovarajućim simulacijama mogu biti nedosledni, nekompletni i redundantni. Kontrolisanje i kvantifikovanje nesigurnosti modela mašinskog učenja koji se obučavaju datim podacima povećava ukupnu pouzdanost DT sistema [18], [19], [20].

2.3 Modeli digitalnog blizanca

“Srce jednog DT sistema su njegova sposobnost da vrši analizu i interpretaciju prikupljenih podataka” [21]. Drugim rečima, osnovu digitalnog entiteta čine moduli za digitalno modelovanje fizičkog objekta (ili sistema) koji analiziraju i/ili interpretiraju jedan ili više aspekata njegovog rada. Modelovanju fizičkih sistema može se pristupiti na više načina. Imajući u vidu reči Džordža Boksa (George Box) “Svi modeli su pogrešni, pojedini su korisni” (“All models are wrong, some are useful”), u zavisnosti od korisničkih potreba i potrebnih karakteristika sistema, potrebno je izvršiti izbor optimalnih modela, alata i metoda.

Prema zakonima na kojim su zasnovani, modeli se mogu razvrstati na:

- modele zasnovane na fizici (PBM);
- modele zasnovani na obradi velike količine podataka metodama veštačke inteligencije (data-driven models, DDM),
- hibridne modele (HM), rešenja zasnovana na prethodna dva koncepta.

Realni entiteti su u opštem slučaju kompleksni objekti, čiji rad se oslikava kroz različite fizičke aspekte. Sada već tradicionalni “multiphysics” modeli (kao na primer [4]), zasnovani su na skupu manje ili više složenih PBM.

Stohastičke ili veoma složene pojave koje zavise od mnogo promenljivih, mogu biti suviše komplikovane da bi se njihovo ponašanje analitički modelovalo čak i veoma kompleksnim PBM. Kao rešenje ovog problema, javlja se sve češća upotreba sistema u kojima se koriste metode mašinskog obučavanja i dubokog učenja.

Postoji i više načina na koje se mogu integrisati analitička znanja i znanja o fizičkim pojavama koja se javljaju u modele mašinskog učenja. U slučaju da nije jednostavno implementirati analitičke formule u sistem, ovom problemu može se pristupiti i na drugi način. Prvo se, uz pomoć simulacionih softvera produkuje set podataka, a zatim se, uz pomoću ovih sintetičkih podataka i podataka sa realnih entiteta izvršiti obučavanje modela mašinskog učenja [5]. Pri modelovanju realnih fizičkih sistema, pogotovo veoma kompleksnih, često se veoma uspešno mogu modelovati primenom fizički zasnovanog mašinskog učenja (Physics-Informed Machine Learning [22]). Kako ove metode uključuju više različitih pristupa modelovanju, ovi sistemi se nazivaju hibridni metodi.

Drugi parametar koji je presudan u izboru modela je vreme. Ukoliko se DT koristi kao aplikacija za kontrolu procesa, podrazumeva se bidirekciona komunikacija i automatizovan rad u realnom vremenu. Ovakav sistem ponaša kao jedna celina, a promena na bilo kom delu sistema propagira kroz ceo sistem. Kompleksnost modela koji je pogodno koristiti u nekoj aplikaciji ograničena je brzinom kojom se fizički procesi odvijaju. Atomističke simulacije fizičkih procesa na super-računarima ne dolaze u obzir za ove potrebe, jer dugotrajne simulacije (višednevne, pa i višenedeljne) nisu od koristi operatorima u upravljanju procesima čije su vremenske konstante niže za jedan ili više redova veličine (npr. sati ili minuti).

Treći faktor je cena modela. Primera radi, za modelovanje malih svakodnevnih objekata troškovi koje atomističke simulacije sa visokom rezolucijom donose su neprihvatljivi.

3 Tehnologije i tehnike koje su omogućile razvoj DT

Pojava tehnologija kao što su IoT i njena industrijska varijanta IIoT, zatim veštačka inteligencija (Artificial Intelligence – AI), mobilne komunikacije sledeće generacije (6G), veliki podaci (Big Data – BD), virtuelna stvarnost (Virtual Reality – VR), proširena stvarnost (Augmented Reality – AR) i Cloud rezultirali su značajnim napretkom u simulaciji, prikupljanju i arhiviranju podataka, komunikaciji, proračunima i analizi podataka [17]. Ovo je podstaklo razvoj mnogih oblasti, između ostalog i razvoj DT sistema. Podaci sa senzora i IIoT uređaja se prenose do digitalnog entiteta, digitalni entitet se nalazi na Cloud okruženju gde se vrši analiza velikih podataka i analiza primenom veštačke inteligencije. U cilju lakšeg pristupa podacima i skalabilnosti, umesto tradicionalnog lokalnog arhiviranja podataka, koristi se Cloud platforma. Rezultati analize i obrade se šalju nazad ka fizičkom entitetu čime se vrši

optimizacija rada, daju predlozi za održavanje, pronalaze greške i kvarovi, vrši predikcija stanja. U DT modelu su takođe bitne komunikacione veze i sigurnost, pouzdanost i integritet podataka.

3.1 Upotreba AI metoda

Podaci koji stižu sa senzora i IIoT uređaja su obimni, a potrebno je u realnom vremenu ili u što kraćem vremenskom intervalu dobiti rezultate i poslati odgovor ka fizičkom entitetu. Tu dolaze do izražaja analitika velikih podataka i alati veštačke inteligencije kao što je mašinsko učenje. Ovi alati daju rezultate u vremenskim intervalima koji su zadovoljavajući za model DT. Ovim se donosi "inteligencija" (racionalno ponašanje) i efikasnost u industrijske procese [23].

Algoritmi veštačke inteligencije imaju veliku ulogu u DT modelu u delu koji se odnosi na obradu velike količine podataka i donošenje odluka. Izbor odgovarajućeg alata je veliki izazov i od njega može zavisti efikasnost DT modela. Izbor zavisi od načina primene, skupa podataka, količine podataka. Neki od AI modela koji se koriste su nadgledano (Supervised Learning), nenadgledano (Unsupervised Learning) i forsirano (Reinforcement Learning) mašinsko učenje, duboko učenje (Deep Learning) i rudarenje podataka (Data Mining [23]).

3.1.1 Obrada podataka

Da bi podatke prikupljene sa mernih sistema i uređaja dalje uspešno koristili za obučavanje algoritama mašinskog učenja i neuralnih mreža, moramo da posvetimo posebnu pažnju kvalitetu podataka i njihovoj predobradi.

Podaci sa mernih uređaja mogu da imaju različite dimenzije, kao i frekvencije uzorkovanja. Isto tako pažnju je potrebno posvetiti nedostajućim podacima, kao i vrednostima koje izlaze iz okvira realno očekivanih vrednosti. Iako ovo možda zvuči trivijalno, problem nedostajućih vrednosti može značajno da utiče na rezultate i na zaključke donete na osnovu njih. Generalno, postoje tri načina na koje ovaj problem može da se reši [24]. Najjednostavniji od njih je uklanjanje merne tačke. Sledeći metod koji se može primeniti je imputacija (interpolacija nedostajućih podataka). Ovaj metod je veoma koristan pri radu sa malim količinama podataka.

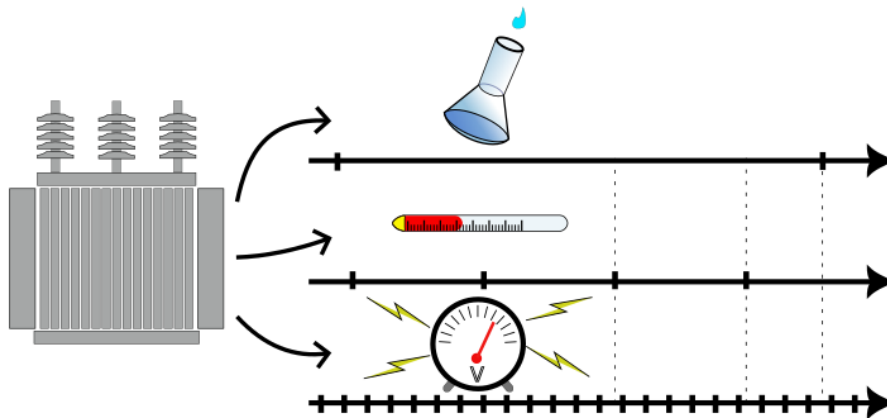
Isto tako, može se koristiti metoda učenja reprezentacije podataka. Ova metoda transformiše ulazne parametre (prikupljene podatke) u novu reprezentaciju i/ili vrši odabir podskupa podataka koji su ključni za opisivanje pojava i promena. Učenje nove reprezentacije često otkriva kompleksne veze i zavisnosti među podacima, što vodi ka konzistentnijim rezultatima.

Bitno je napomenuti da na merenja mogu uticati i ambijentalne i sistemske greške periodičnog tipa. U slučaju da je frekventni spektar ovih šumova uzak,

možemo ih lako ukloniti iz merenja uz pomoću kako fizičkog filtriranja signala, tako i pomoću softverskih rešenja.

Različiti senzori, i shodno tome i merne veličine mogu imati različite frekvencije uzorkovanja. Razlozi za to mogu biti kao i sama vremena koja su potrebna da se veličine izmere senzorom (vremena integracije), vreme potrebno da se neka veličina izmeri mernom procedurom (laboratorijska i hemijska analiza), ali i generalno nemogućnost da se svakom delu sistema pristupi u svakom momentu i ta merenja izvrše. Isto tako, neke od veličina se vidno menjaju tek pri dužim vremenskim intervalima posmatranja.

Na Slici 3 dat je prikaz različitih frekvencija online merenja koje vršimo na sistemu (primer transformatora). Generalno, merenja električnih veličina (brzopromenljive veličine) se vrše frekventnije od merenja temperatura (sporopromenljiva veličina), dok se hemijski procesi odvijaju još sporije. Pojedina ispitivanja (određena hemijska ispitivanja i vizuelni pregled mehaničkog stanja opreme na primer) su invazivna (zahtevaju fizički pristup objektu), vrše se offline i čije analize zahtevaju najviše vremena.



Slika 3. Prikaz različitih frekvencija merenja koje vršimo na sistemu (primer transformatora)

Kao dodatni problem, merenja sa više senzora, čak i ako imaju iste frekvencije, mogu biti sa vremenskim pomerajem (analogno fazi). Ponekad i sam fizički proces u tački A gde se nalazi prvi senzor gde merimo prvu veličinu, poseduje kauzalno kašnjenje do tačke B gde se nalazi drugi senzor, gde merimo drugu veličinu, koja je uzročno povezana sa prvom. Jedan od primera razrešenja ove problematike može se naći u primeru iz petrohemijske industrije [25], gde fizička i hemijska merenja sa svih sondi i sistema moraju da budu usklađena.

4 DT u elektroenergetici – state-of-the-art i perspektiva

Energetska transformacija je započeta spontano u nekim EES razvijenih zajednica. U početku su solarne, vetro i (geo)termalne elektrane shvatanje kao entuzijazam inventivnog kapitala. Kasnije su shvaćene kao ozbiljan remetički faktor EES i institucionalno je suzbijana njihova ekspanzija. Danas smo u situaciji da se ceo elektroenergetski sektor menja da bi odgovorio zahtevima savremenog koncepta energetske tranzicije. Dosadašnja energetika u svetu se pretežno oslanjala na fosilna goriva. Zahtevani rast i obim potrošnje energije dovodi do neodrživosti dosadašnjeg koncepta. Pored obaveza zelene tranzicije, neophodna je i dublja sistemska tranzicija energetske sektora u pravcu "energetskog suvereniteta" pojedinih zajednica. Tako je nastao koncept energetske tranzicije koji se temelji na tri ključna elementa koji pokreću transformaciju globalnog energetske sistema, tzv. 3D transformacija: dekarbonizacija, decentralizacija i digitalizacija [21].

Za analizu u ovom radu fokus je na procesu digitalizacije u kontekstu celokupne energetske transformacije. U početku razvoja digitalnih sistema u elektroenergetici, digitalizacija je podrazumevala zamenu analognih sistema merenja i automatskog upravljanja sa (polu)digitalnim sistemima. To je značilo digitalizaciju podataka sa odgovarajućih senzora i instrumenata uz korišćenje procesorskih sistema za određena izračunavanja i regulaciju radnih parametara procesa. Savremena digitalizacija podrazumeva masovno prikupljanje podataka, naprednu analitiku, mašinsko obučavanje i druge digitalne tehnologije za analizu i predviđanje performansi. Jedan od naprednijih koncepta digitalizacije je digitalni blizanac koji se od kompleksnih sistema automatskog upravljanja razlikuje po alatima za obradu velikog broja različitih podataka, dijagnostike i predviđanja ponašanja u budućnosti.

4.1 DT u kontekstu energetske transformacije

Prema više izvora, najčešće energetske transformacije 3D čine tri stuba: dekarbonizacija, decentralizacija i digitalizacija [21].

Dekarbonizacija se odnosi na smanjenje ili eliminaciju emisija ugljen-dioksida (CO₂) i drugih gasova staklene bašte. Cilj je da se postigne njihova neto nulta emisija do 2050. godine uz podršku tranzicije zasnovane na nauci (SBTi) do 2030. godine. Agenda podrazumeva napuštanje fosilnih goriva i povećanje udela obnovljivih izvora energije. Do sada se izvori energije poput sunca, vetra, hidro tokova, plime i oseke kao i geotermalna energija koriste sa različitim stepenom uspeha već vekovima, pa i milenijumima. Prepreku za njihovo intenzivnije korišćenje čini njihova mala gustina snage, postojanost i dostupnost. Naučno tehnički razvoj novih tehnologija proizvodnje, zatim skladištenja energije (hidro potencijal, akumulatorske baterije, vodonik, itd.) kao i digitalnih tehnologija podižu nivo održivosti i razvoja solarne, vetro i toplotne energetike.

Decentralizacija treba da omogući tranziciju dosadašnjeg koncepta centralizovane proizvodnje, prenosa i distribucije električne energije (gde se energija pretežno proizvodi u velikim elektranama i prenosi na velike udaljenosti do potrošača) ka konceptu distribuiranog energetskeg sistema kojeg karakteriše manja i lokalizovana proizvodnja energije. Sistem kao celina će i dalje da postoji preko interkonekcija za prelivanje tokova energije. Pomenute nove tehnologije omogućavaju stvaranje hibridnih mikromreža u lokalizovanim energetskegim čvorištima u vidu privatnih industrijskih mikromreža ili regionalnih mreža koje koriste lokalna dobra (sunce, geotermalne vode, vetar) sa većim stepenom izbora njihovog udela. Decentralizovane mreže pružaju povećanu energetskeg sigurnost i otpornost, smanjujući zavisnost od uvoza fosilnih goriva i ranjivost na različite napade.

Digitalizacija odnosno digitalna transformacija elektro energetskeg sektora uključuje primenu digitalnih tehnologija, komunikacionih sistema i tehnologija napredne analitike za optimizaciju poslovnih procesa proizvodnje, distribucije i potrošnje energije. Digitalizacija se oslanja na različita tehnološka dostignuća kao što su pametne mreže, uređaji za IloT, AI, mašinsko učenje i analitiku podataka. Od posebnog značaja je razvoj tehnologija digitalnih blizanaca i sistema u (elektro)energetskeg industriji koje daju mogućnosti prediktivne analitike, napredne prakse održavanja i podizanje ukupnih performansi EES.

Osnovne funkcije koje DT elektroenergetskeg opreme treba da obavlja su: uvid u trenutno stanje sistema, planiranje i optimizacija održavanja i predikcija ponašanja opreme. Uvid u trenutno stanje sistema, osim praćenja ključnih parametara i veličina u realnom vremenu podrazumeva i detekciju anomalnih režima rada (na primer smanjenje efikasnosti hlađenja usled zaprljanja rashladnih površina razmenjivača toplote ili pogoršanja karakteristika ventilatora ili uljnih pumpi), kvarova, kao i dijagnostiku. Optimizacija procesa održavanja podrazumeva minimizaciju troškova potrošnog materijala, rezervne opreme i sati tokom kojih je pogon nedostupan, kao i mogućnost predikcije kvarova i pravovremene intervencije. Mogućnost simulacije rada u bližoj ili daljoj budućnosti predstavlja odgovor na potrebe sistema da zadovolji zahteve u vanrednim okolnostima; na primer, prilikom zahteva visoke potrošnje konzuma u nepovoljnim uslovima rada mreže (npr. prilikom *blackout*-a EESa susednih država).

4.2 Individualizacija DT

Do sada su elektrane projektovane za dugo trajanje u uslovima ustaljene eksploatacije resursa. To je direktno uticalo na projektovane karakteristike ključnih elemenata proizvodnje električne energije, generatora i transformatora, prekidači i dr. Dominantan rad najvećeg broja ključnih elemenata je bio u ustaljenom režimu snaga i napona uz ustaljenu potrošnju (stabilni potrošači). Određeni deo opreme je bio opredeljen za vršna opterećenja i oni su imali prilagođene performanse. Ovaj deo opreme će se lakše prilagoditi novim

uslovima eksploatacije koji zahtevaju integraciju obnovljivih izvora energije koji su nestalne (volatile) snage. Naime, nove operativne režime karakteriše povećan broj ciklusa "start-stop", manji broj radnih sati sa punim opterećenjem, duži rada u stanju pripravnosti i značajno povećan broj termičkih ciklusa opterećenja. Osnovno pitanje koje se postavlja pred inženjere je kako prilagoditi postojeće sisteme novim uslovima eksploatacije [26].

Postojeći sistemi upravljanja (SCADA, DCS, ...), zatim sistemi različitih monitoringa ključnih elemenata prikupljaju veliki broj podataka, i po obimu i po vrsti (masivni podaci, veliki podaci). Pristup DT se oslanja na ogroman broj podataka koji postoje iz dosadašnjeg perioda kao i na brojne podatke iz novijeg perioda. Pri tome se „uračunava“ činjenica da su podaci iz sasvim drugačijih uslova eksploatacije i to za svaku pojedinačnu mašinu posebno. Agregacija podataka iz različitih uslova eksploatacije se može vršiti uz napredne statističke i analitičke metode i modele. Jedan od problema koji model DT rešava je usklađivanje numeričkih podataka pojedinih veličina u smislu brzine uzorkovanja, sinhronizacije i druge „uparenosti“. Za proveru valjanosti procena koriste se AI, mašinsko obučavanje i niz drugih savremenih tehnika.

Za svaku mašinu se prati značajan broj procesnih veličina kao što su struje, naponi, snage, temperature, pritisci, protoci, vibracije i drugih. Oni se pored upravljanja procesima mogu koristiti za dijagnostiku stanja elemenata mašine. Takođe se prate i veličine koje dodatno ukazuju na stanje elemenata mašina kao što su dodatne vibracije, parcijalna pražnjenja, fluks, zazor i dr. Dodatne informacije se mogu dobiti iz elemenata i sistema zaštite mašine kao i nekih pratećih sistema koji nisu na prvi pogled dijagnostičke veličine, kao što je praćenje protoka i karakteristika rashladnog fluida i nekih drugih veličina. Procenjuje se da se ukupno prati preko 60 operativnih veličina i parametara koji su relevantni za praćenje stanja velikih mašina. Ovim podacima treba dodati fabričke podatke proizvodnje i ispitivanja na mestu instalacije, zatim i podatke o transportu, održavanju, vanrednim događajima i dr.

Posebnu temu predstavlja implementacija sistema zasnovanih na DT na već postojeće objekte. Ključni problemi koji se tom prilikom mogu javiti su nedostatak istorijskih podataka i osnovne infrastrukture za njihovo prikupljanje. Navedeni problemi se mogu inicijalno rešiti korišćenjem poznatih podataka za slične objekte, te dodavanjem infrastrukture (po potrebi) i snimanjem parametara potrebnih za PBM i obuku DDM.

5 DT energetskih uljnih transformatora (Power Transformer DT – PTDT)

Veliki broj naučnih radova poslednjih godina [27] ukazuje da stručna javnost uviđa perspektivnost razvoja DT elektroenergetskih objekata. CIGRE radna grupa JWG A2/D2.65 osnovana je 2022. godine [21] sa ciljem razmene

postojećih znanja i ubrzanja razvoja PTDT, što takođe ukazuje da je ova tema veoma aktuelna.

Ključne prednosti primene PTDT su automatizacija procesa uočavanja i identifikacija anomalija, dijagnostike kvarova, kao i njihove lokalizacije. Praktično, PTDT ima ulogu „smart-multiphysics“ monitoring sistema, tj. asistenta zaposlenima u službama održavanja. Ovakav sistem značajno povećava mogućnosti monitoringa opreme dodavanjem novih funkcionalnosti i praćenja veličina i parametara koji se ne mogu direktno meriti. Osim toga, DT ima primenu u planiranju i optimizaciji procesa održavanja sa ciljem povećanja dostupnosti ET, posebno u periodima povećane potrošnje ili visoke cene električne energije na tržištu. DT sistem korisniku pravovremeno dostavlja informaciju o optimalnom rasporedu aktivnosti održavanja. Iako se prediktivno održavanje često ističe kao cilj, prema našem saznanju, u elektroenergetici to još uvek nije standard nigde u svetu. Isto se može reći i za primenu DT na ET i elektroenergetsku opremu uopšte – sistemi različitog nivoa integracije postoje, Industry 4.0 infrastruktura se može učiniti dostupnom, postoje kvalitetni podaci, a postoje i brojni modeli pogodni za upotrebu u DT sistemima – i pored toga, primena DT tehnologije je i dalje daleko od toga da postane svakodnevnica.

Opšta konceptualna šema data na Slici 3 (poglavlje 2) može se primeniti i konkretno na PTDT.

Osim za potrebe automatske zaštite, merenja, akvizicija i skladištenje podataka različitih veličina su neizostavni kod kapitalnih ET, pri čemu postoji tendencija da i manji uređaju budu pokriveni monitoring sistemima koje prate najvažnije parametre. Pre svega, ovde se misli na merenja struja, napona i temperature gornjeg ulja u džepu suda. Ovim merenjima često se pridodaju merenja parametra i veličina izolacionog sistema (promena $tg\delta$ i kapaciteta provodnih izolatora), merenja koncentracije karakterističnih gasova u ulju, direktna merenja temperatura namotaja i rashladnih fluida i merenja parcijalnih pražnjenja.

U idealnom slučaju, PTDT bi trebao da verno prati sve aspekte rada EUT. U realnom sistemu, smislenije i svrsishodnije je praćenje onih aspekata koji su od suštinske važnosti sa rad transformatora. Tu se, pre svega, podrazumevaju:

- Elektromagnetski modeli;
- Elektromehanički modeli;
- Termički modeli;
- Modeli starenja čvrste izolacije.

Pri tome treba voditi računa da neki aspekti po prirodi jesu „multifizički“, odnosno, za njihovo opisivanje je neophodan multidisciplinarni pristup. Imajući u vidu složenost jednog ovakvog sistema, ideja o neophodnosti njegovog modularnog razvoja se sama nameće.

Očigledno je da se ovde radi o procesima čije se vremenske konstante razlikuju i za nekoliko redova veličina. O ovome je već bilo reči u poglavlju 3.

(Slika 2). Prilikom izrade dinamičkih multifizičkih modela, o ovoj pojavi je potrebno voditi računa.

Potrebno je naglasiti i da deo PTDT mogu biti i modeli pojedinih njegovih komponenti. Kao jedan primer potrebno je pomenuti regulator napona (tap changer), vitalan i kapitalan deo nekih EUT od čijeg stanja zavisi i ukupno stanje transformatora. Osim toga treba imati u vidu i komponente rashladnog sistema (pumpe, ventilatore i razmenjivače toplote).

Veoma je važno naglasiti da, osim podataka sa senzora, za optimalnu parametrizaciju i rad sistema neophodni su i detalji dizajna, podaci sa fabričkih ispitivanja, kao i podaci o intervencijama i održavanju koje unosi čovek, a koji su najčešće dostupni u formi izveštaja.

U nastavku poglavlja biće rečima o modelima pojedinih aspekata rada EUT. U literaturi se pojavljuju sva tri tipa modela (PBM, DDM i hibridni modeli).

5.1 Modeli energetskih uljnih transformatora

U nastavku će biti navedeni modeli najvažnijih aspekata rada EUT. Kod velikih EUT, praćenje parametara koji su predmet pojedinih modela se u nekoj formi praktično uvek vrši pomoću monitoring sistema. Važno je primetiti da neke fizičke pojave predstavljaju skup različitih aspekata rada transformatora, te je za njihovo modelovanje neophodan multidisciplinarn pristup. U smislu organizacije DT sistema, ovo znači da je za preciznije modelovanje nekih fizičkih pojava neophodna razmena podataka između pojedinih modela (modula ili podsistema) – tj. izlazi i međurezultati jednog mogu postati ulaz u neki drugi.

5.1.1 Elektromagnetski modeli energetskog uljnog transformatora

Modelovanje elektromagnetskih pojava uglavnom se vrši upotrebom PBM. Zapravo, izbor modela suštinski zavisi od brzine posmatrane pojave, tj. od frekvencije signala napona i struja. Za modelovanje ponašanja transformatora iz perspektive mreže (50 Hz), model predstavljen relativno jednostavnom zamenskom T šemom sa koncentrovanim parametrima je dobar izbor. Za modelovanje ponašanja na visokim frekvencijama (višim od 1MHz, što odgovara veoma brzim prenaponima), moraju se koristiti modeli sa distribuiranim parametrima, dok se za "srednje brze" pojave (npr. pri analizi uticaja nelinearnih opterećenja i prostiranje prenaponskih talasa) mogu koristiti hibridna rešenja [28], kao na primer takozvane "coupled ladder" mreže [29].

Elektromagnetni modeli koji su od posebnog interesa za upotrebu u multifizičkim modelima (usko vezani za mehaničke i termičke modele) su modeli za proračun raspodele polja. Najčešće su u upotrebi atomistički modeli zasnovani na metodi konačnih elemenata (Finite element method, FEM) [30].

5.1.2 Elektromehanički modeli

Mehaničkim modelima opisuju se mehanički stres i pomeraji provodnika transformatorskih namotaja koji nastaju pri pojavi velikih struja kratkog spoja. Ovi modeli su veoma korisni u detekciji deformacije namotaja. U analizi ovih elektromehaničkih pojava u praksi se najčešće koriste FEM simulacije za proračun raspodele rasutog fluksa, struja i elektromagnetnih sila.

U [21] predložen je koncept hibridnog modela pogodnog za upotrebu u DT aplikacijama, gde se na osnovu niza FEM simulacija formiraju matrice parametara čije se vrednosti koriste u modelu sa koncentrisanim parametrima za proračun krivih frekventnog odziva (Frequency response analysis, FRA). Na ovaj način, formira se baza FRA otisaka pomoću kojih je moguće odrediti trenutno stanje namotaja.

5.1.3 Termički model energetskog uljnog transformatora

U praksi, termički modeli EUT su dominantno PBM. Poslednjih godina postoji povećano interesovanje za DDM [31], [32] [33].

Kada su u pitanju PBM, postoje tri osnovna pravca.

Još uvek su u upotrebi jednostavni empirijski modeli poput modela predloženog u IEC standardu [34].

Modeli zasnovani na FEM i CFD (Computational Fluid Dynamics) metodama, koje karakteriše visoka tačnost i mogućnost modelovanja lokalnih pojava, ali i veoma veliki računarski zahtevi [35].

Treći pristup je primenom detaljnog termohidrauličkog modela [36], [37]. Ovaj model predstavlja svojevrsni model sniženog reda (Reduced Order Model, ROM), i praktično se radi o veoma složenom modelu sa koncentrisanim parametrima koji rešava sistem nelinearnih termičkih i hidrauličkih jednačina generisanih na osnovu termičkih i hidrauličkih 2D mreža. Elementi ovih mreža su pojedinačni provodnici i uljni kanali.

Hibridni modeli sve više dobijaju na popularnosti. Pod hibridnim modelima se, pre svega, podrazumevaju ROM. Jedan primer je „Proper Orthogonal Decomposition“ (POD). POD u suštini koristi rezultate simulacija zasnovanih na nekim kompleksnim PBM, poput FEM i CFD simulacija, za treniranje modela zasnovanih na metodama mašinskog učenja [38]. Rezultat ovog procesa su modeli čiji je red (kompleksnost) neuporedivo niži od osnovne metode, a samim tim i vreme izvršenja algoritma. 3D FEM/CFD simulacije celog transformatora mogu da traju danima, dok je potreban odziv proračuna temperature namotaja i gornjeg ulja transformatora reda veličine do nekoliko minuta (poželjno i manje od 1 minuta).

5.1.4 Model starenja čvrste izolacije

Zakovitosti starenja izolacionog papira u EUT se proučavaju već dugi niz godina, uz kontinuirane napore da se izradi fizički model koji bi precizno predviđao promene. S obzirom da na starenje izolacije utiče više faktora, od kojih su najvažniji temperatura, prisustvo vlage, kiseonika i kiselina, pri čemu promena ovih parametara ne samo da utiče na brzinu starenja već i na mehanizam starenja izolacionog papira, ovo uopšte nije lak zadatak te je i dalje ostao jedan od najtežih izazova kada je u pitanju procena pouzdanosti ET. Do sada je najviše pomaka napravljeno eksperimentalnim istraživanjima u laboratorijskim uslovima i na nivou modela transformatora. Kontrola parametara gde je moguće menjati jedan parametar, a ostale održavati konstantnim je od izuzetne važnosti za formiranje kompleksnih modela. Jedan od najboljih modela simulacije starenja izolacionog papira trenutno je model Lelekakis-Martin [39]. Ovaj model, uspostavljen na osnovu laboratorijskih istraživanja, baziran je na Arenijusovom modelu zavisnosti od temperature, ali uzima u obzir i sadržaj vode u izolaciji i različite opsege sadržaja kiseonika i kiselina u ulju. Ovakve modele je dalje neophodno povezati sa termičkim modelima koji daju distribuciju temperature po visini namotaja, kao i sa modelima koji spram podataka o temperaturi i sadržaju vode dalje daju raspodelu vlage po visini namotaja.

Imajući u vidu kompleksnost fizičkih modela, od velike je važnosti ove modele povezati sa DDM kako bi se pomoću realnih podataka za određene tipove transformatora unapredili postojeći fizički modeli. Takođe, upotrebom AI alata, mogle bi se utvrditi nove zakonitosti koje je zbog sinergije uticaja različitih faktora koji menjaju celokupni hemijski mehanizam degradacije papira teorijskim pristupom gotovo nemoguće utvrditi. Na ovaj način bili bi formirani hibridni modeli, pri čemu bi kod takvih modela bilo neophodno da postoji brz odgovor na promene koje se dešavaju u dinamičkom sistemu kakav je ET i da se starenje izolacije računa inkrementalno, u malim vremenskim intervalima. Pokušaji pravljenja ovakvih modela već postoje [40]. Mana ovakvih modela je što je za njihovu potvrdu/verifikaciju u realnom sistemu potrebno mnogo vremena.

Uporedo sa razvojem modela starenja izolacije baziranih na kinetici hemijskih reakcija, konstantno se radi i na razvoju modela za procenu trenutnog stanja izolacije na osnovu parametara kao što je npr. sadržaj derivata furana u ulju koji nastaju kao produkti starenja. Razvojem prethodno opisanih modela koji bi kao rezultat davali procenu ostarelosti izolacije i vezivanje sa modelima koji kao rezultat daju očekivani sadržaj derivata furana u ulju, mogli bi se razviti modeli koji bi davali kompletnu sliku stanja izolacionog papira, ali bi i za verifikaciju ovakvih modela bilo neophodno vreme.

6 Zaključak i planovi za razvoj

U radu je izvršen pregled evolucije definicije i koncepta DT. Izvršen je pregled opšte literature iz oblasti DT, utvrđeno je trenutno stanje tehnike i identifikovani su pravci razvoja u budućnosti. Posebna pažnja posvećena je DT u elektroenergetici. Razvoj DT sistema u elektroenergetici tek poslednjih godina postaje ozbiljna tema, a implementacija je još uvek u početnim fazama.

Osnovne prednosti DT su sinergija postojećih sistema prikupljanja podataka (SCADA, DCS), monitoring sistema, naprednih fizičkih modela i metoda veštačke inteligencije, čime se dodaje nova dimenzija poznavanju stanja opreme i otvara mogućnost prognoze stanja u budućnosti, a samim time i mogućnost optimizacije proizvodnje i održavanja opreme.

Inženjerska javnost danas vidi DT kao optimalan pristup naprednom monitoringu elektroenergetske opreme i njenom prediktivnom održavanju. Istovremeno, primetan je i nedostatak publikacija, stručnih i naučnih, u kojima je prezentovana primena sistema zasnovanih na DT u praktičnim uslovima, kao operativan i potpuno integrisan u proizvodnju.

Osim akademske, autori rada pre svega prepoznaju praktičnu potrebu za ovakvim sistemima. Najveće izazove u implementaciji DT sistema predstavljaju bezbednost podataka (bezbedan pristup Cloud serverima) i implementacija na već postojećim objektima.

Autori planiraju izradu konceptualnog rešenja jednog modularnog PTDT sistema na modernoj Industry 4.0 infrastrukturi, a zatim i izradu demo verzije PTDT sistema. Konačan cilj poduhvata je razvoj novih i evaluacija postojećih modela na realnim podacima, a zatim i njihova integracija u PTDT sistem.

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 451-03-66/2024-03).

Literatura

- [1] L. D. Xu, E. L. Xu, and L. Li, "Industry 4.0: state of the art and future trends," *International Journal of Production Research*, vol. 56, no. 8, pp. 2941–2962, Mar. 2018, doi: 10.1080/00207543.2018.1444806.
- [2] M. Grieves, *Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products Through Product Lifecycle Management*. 2011.
- [3] M. Grieves, "Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication," *NASA, White Paper*, vol. 1, no. 1, 2014.

- [4] E. Glaessgen and D. Stargel, "The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles," in *53rd Structures, Structural Dynamics and Materials Conference: Special Session on the Digital Twin*, Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Apr. 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.2514/6.2012-1818>.
- [5] A. Thelen et al., "A comprehensive review of digital twin — part 1: modeling and twinning enabling technologies," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 65, no. 12, Nov. 2022, doi: 10.1007/s00158-022-03425-4.
- [6] A. Fuller, Z. Fan, C. Day, and C. Barlow, "Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 108952–108971, 2020, doi: 10.1109/access.2020.2998358.
- [7] A. M. Madni, C. C. Madni, and S. D. Lucero, "Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering," *Systems*, vol. 7, no. 1, p. 7, Jan. 2019, doi: 10.3390/systems7010007.
- [8] Q. Qi et al., "Enabling technologies and tools for digital twin," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 58, pp. 3–21, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jmsy.2019.10.001.
- [9] ISO/IEC, *International Standard, ISO/IEC 30173, Digital twin - Concepts and terminology*. 2023.
- [10] ISO/IEC, *International Standard, ISO/IEC 30172, Internet of thing (IoT) - Digital twin - Use cases*. 2023.
- [11] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, and L. Xu, "Edge Computing: Vision and Challenges," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 5, pp. 637–646, Oct. 2016, doi: 10.1109/jiot.2016.2579198.
- [12] K. Cao, Y. Liu, G. Meng, and Q. Sun, "An Overview on Edge Computing Research," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 85714–85728, 2020, doi: 10.1109/access.2020.2991734.
- [13] H. Atlam, R. Walters, and G. Wills, "Fog Computing and the Internet of Things: A Review," *Big Data and Cognitive Computing*, vol. 2, no. 2, p. 10, Apr. 2018, doi: 10.3390/bdcc2020010.
- [14] S. Al-Sarawi, M. Anbar, K. Alieyan, and M. Alzubaidi, "Internet of Things (IoT) communication protocols: Review," in *2017 8th International Conference on Information Technology (ICIT)*, IEEE, May 2017, pp. 685–690. Accessed: Nov. 05, 2024. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/icitech.2017.8079928>.
- [15] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. Townsley, "A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things," *Sensors*, vol. 16, no. 9, p. 1466, Sep. 2016, doi: 10.3390/s16091466.
- [16] S. D. Milic and B. M. Babic, "Toward the Future—Upgrading Existing Remote Monitoring Concepts to IIoT Concepts," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 12, pp. 11693–11700, Dec. 2020, doi: 10.1109/jiot.2020.2999196.

- [17] H. Wu, P. Ji, H. Ma, and L. Xing, "A Comprehensive Review of Digital Twin from the Perspective of Total Process: Data, Models, Networks and Applications," *Sensors*, vol. 23, no. 19, p. 8306, Oct. 2023, doi: 10.3390/s23198306.
- [18] U. Elele, A. Nekahi, A. Arshad, and I. Fofana, "Towards Online Ageing Detection in Transformer Oil: A Review," *Sensors*, vol. 22, no. 20, p. 7923, Oct. 2022, doi: 10.3390/s22207923.
- [19] S. T. Zahra, S. K. Imdad, S. Khan, S. Khalid, and N. A. Baig, "Power transformer health index and life span assessment: A comprehensive review of conventional and machine learning based approaches," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 139, p. 109474, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.engappai.2024.109474.
- [20] S. Ahamad, I. H. Rather, and R. Gupta, "Uncertainty Quantification in Advanced Machine Learning Approaches," in *Advances in Social Networking and Online Communities*, IGI Global, 2023, pp. 245–258. Accessed: Nov. 07, 2024. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.4018/978-1-6684-6909-5.ch011>.
- [21] 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.
- [22] G. E. Karniadakis, I. G. Kevrekidis, L. Lu, P. Perdikaris, S. Wang, and L. Yang, "Physics-informed machine learning," *Nature Reviews Physics*, vol. 3, no. 6, pp. 422–440, May 2021, doi: 10.1038/s42254-021-00314-5.
- [23] M. M. Rathore, S. A. Shah, D. Shukla, E. Bentafat, and S. Bakiras, "The Role of AI, Machine Learning, and Big Data in Digital Twinning: A Systematic Literature Review, Challenges, and Opportunities," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 32030–32052, 2021, doi: 10.1109/access.2021.3060863.
- [24] Y. Zhou, S. Aryal, and M. Reda Bouadjenek, "A Comprehensive Review of Handling Missing Data: Exploring Special Missing Mechanisms," *arXiv preprint arXiv:2404.04905 (2024)*.
- [25] Q. Min, Y. Lu, Z. Liu, C. Su, and B. Wang, "Machine Learning based Digital Twin Framework for Production Optimization in Petrochemical Industry," *International Journal of Information Management*, vol. 49, pp. 502–519, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2019.05.020.
- [26] S. Musielak, H. Steins, J. Hoffmann, and M. Ackermann, "Evaluation and Assessment of Operational Data for Condition Based Service Interventions on Synchronous Machines," in *CIGRE Paris Session 2024*, 2024, p. 11712.
- [27] J. B. Heluany and V. Gkioulos, "A review on digital twins for power generation and distribution," *International Journal of Information Security*, vol. 23, no. 2, pp. 1171–1195, Dec. 2023, doi: 10.1007/s10207-023-00784-x.

- [28] X. Mao, "Transfer function estimation and AI application for transformer FRA interpretation," Ph.D. thesis, The University of Manchester, 2020.
- [29] M. S. Jahan, R. Keypour, H. R. Izadfar, and M. T. Keshavarzi, "Detecting the location and severity of transformer winding deformation by a novel adaptive particle swarm optimization algorithm," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 29, no. 1, p. e2666, Jul. 2018, doi: 10.1002/etep.2666.
- [30] Z. Radakovic, U. Radoman, and P. Kostic, "Decomposition of the Hot-Spot Factor," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 1, pp. 403–411, Feb. 2015, doi: 10.1109/tpwr.2014.2352039.
- [31] J. Feng, Z. Feng, G. Jiang, G. Zhang, W. Jin, and H. Zhu, "A Prediction Method for the Average Winding Temperature of a Transformer Based on the Fully Connected Neural Network," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 15, p. 6841, Aug. 2024, doi: 10.3390/app14156841.
- [32] Y. Sun *et al.*, "Hotspot Temperature Prediction of Dry-Type Transformers Based on Particle Filter Optimization with Support Vector Regression," *Symmetry*, vol. 13, no. 8, p. 1320, Jul. 2021, doi: 10.3390/sym13081320.
- [33] T. Wu, F. Yang, U. Farooq, X. Li, and J. Jiang, "An online learning method for constructing self-update digital twin model of power transformer temperature prediction," *Applied Thermal Engineering*, vol. 237, p. 121728, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121728.
- [34] IEC, *International Standard, IEC 60076-7 Power transformers - Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers*. 2018.
- [35] F. Torriano, H. Campelo, M. Quintela, P. Labbé, and P. Picher, "Numerical and experimental thermofluid investigation of different disc-type power transformer winding arrangements," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 69, pp. 62–72, Feb. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2017.11.007>
- [36] Z. R. Radakovic and M. S. Sorgic, "Basics of Detailed Thermal-Hydraulic Model for Thermal Design of Oil Power Transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 2, pp. 790–802, Apr. 2010, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2033076>
- [37] 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 Transactions on Power Delivery*, pp. 1–9, 2024, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2024.3466297>
- [38] L. Wang, X. Dong, L. Jing, T. Li, H. Zhao, and B. Zhang, "Research on digital twin modeling method of transformer temperature field based on POD," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 299–307, Apr. 2023, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.03.010>

- [39] N. Lelekakis, D. Martin, and J. Wijaya, "Ageing rate of paper insulation used in power transformers Part 1: Oil/paper system with low oxygen concentration," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19, no. 6, pp. 1999–2008, Dec. 2012, doi: [10.1109/tdei.2012.6396958](https://doi.org/10.1109/tdei.2012.6396958).
- [40] H. Luo, L. Cheng, L. Yang, X. Zhao, R. Liao, and Y. Zhang, "A Novel Approach to Building Digital Twin Transformers by Combining Virtual-Real Sensing: An Example of Degree of Polymerization Distribution," Elsevier BV, 2023. Accessed: Nov. 07, 2024. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4543144>

Abstract. This paper provides a literature review and establishes the state-of-the-art in the concept and application of Digital Twin (DT) technology to power transformers. The introductory sections focus on the evolving definition and universal concepts of DT, independent of specific fields of application, as well as the goals of Industry 4.0 and the technologies that enable digital transformation in industry. Special attention is given to the particularities of the power industry, with an emphasis on the unique requirements posed by the nature and importance of oil-filled power transformers, which serve as the foundation for the development of systems based on DT technologies.

Keywords: digital twin, oil-immersed power transformer, literature review, industry 4.0, digital transformation.

Concept and Application of Digital Twins for Oil-Immersed Power Transformers

Uroš Radoman¹, Filip Kilibarda², Nenad Kartalović³,
Nikola Miladinović⁴, Vladimir Polužanski⁵, Valentina Vasović⁶, Branko
Pejović⁷, Aleksandar Žigić⁸, Jelena Lukić⁹

Rad primljen u uredništvo: 08.11.2024. godine.

Rad prihvaćen: 18.12.2024. godine.