

IZVEŠTAJ O OCENI DOKTORSKE DISERTACIJE
„INTEGRALNI PRISTUP RAZVOJU MODELA DIJAGNOSTIKE TURBINSKIH
VRATILA U ENERGETICI”

Kandidat: MSc Dragoljub Ilić

I PODACI O KOMISIJI

1. Datum i organ koji je imenovao komisiju:
08.09.2020. godine, Nastavno-naučno veće Tehničkog fakulteta „Mihajlo Pupin“ u Zrenjaninu.
2. Sastav komisije sa naznakom imena i prezimena svakog člana, zvanja, naziva uže naučne oblasti za koju je izabran u zvanje, datuma izbora u zvanje i naziv fakulteta, ustanove u kojoj je član komisije zaposlen:
 - 1) **Prof. dr Branko Škorić**, redovni profesor, uža naučna oblast: Tehnologija termičke obrade i inženjerstva površina, 13.06.2011. god. Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, **predsednik komisije**
 - 2) **Prof. dr Dragan Milošević**, vanredni profesor, uža naučna oblast: Drumski saobraćaj i transport, 07.11.2018. god. Univerzitet Privredna akademija, Fakultet za ekonomiju i inženjerski menadžment, Novi Sad, **član komisije**
 - 3) **Prof. dr Eleonora Desnica**, vanredni profesor, uža naučna oblast: Industrijsko inženjerstvo, 28.10.2016. god. Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin, **član komisije**
 - 4) **Prof. dr Jasmina Pekez**, vanredni profesor, uža naučna oblast: Industrijsko inženjerstvo, 01.10.2020. god. Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin, **član komisije**
 - 5) **Prof. dr Ljiljana Radovanović**, vanredni profesor, uža naučna oblast: Industrijsko inženjerstvo, 15.10.2017. god. Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin, **mentor**

II Podaci o kandidatu

1. Ime, ime jednog roditelja, prezime:
Dragoljub (Zoran) Ilić
2. Datum i mesto rođenja, opština, Republika:
27.05.1958., Kičevo, Republika Makedonija
3. Naziv fakulteta, naziv studijskog programa diplomskih akademskih studija – master i stečeni stručni naziv:
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Mašinsko inženjerstvo, Master inženjer mašinstva

4. Godina upisa na doktorske studije i naziv studijskog programa doktorskih studija

2013, Inženjerski menadžment

5. Naziv fakulteta, naziv magistarske teze, naučna oblast i datum odbrane

6. Naučna oblast iz koje je stečeno akademsko zvanje magistra nauka

III NASLOV DOKTORSKE DISERTACIJE:

„INTEGRALNI PRISTUP RAZVOJU MODELA DIJAGNOSTIKE TURBINSKIH VRATILA U ENERGETICI”

IV PREGLED DOKTORSKE DISERTACIJE:

Navesti kratak sadržaj sa naznakom broja strana, poglavlja, slika, šema, grafikona i sl.

Doktorska disertacija pod nazivom „*Integralni pristup razvoju modela dijagnostike turbinskih vratila u energetici*” urađena je na 185 strana teksta. Disertacija se sastoji iz 12 poglavlja, 59 slika, 21 tabele, 190 referenci i 5 priloga. Na početku disertacije je dat naziv disertacije, ključna dokumentacijska informacija na srpskom i engleskom jeziku i sadržaj. Na kraju disertacije je navedena kratka biografija kandidata.

Struktura doktorske disertacije se sastoji iz sledećih poglavlja:

1. UVOD
 2. METODOLOŠKI KONCEPT ISTRAŽIVANJA
 3. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA U PREDMETNOJ OBLASTI
 4. ENERGETSKI SISTEM HIDROELEKTRANA “ĐERDAP II“
 5. POUZDANOST SISTEMA ODRŽAVANJA I KONTROLE
 6. METODE I MODELI PROCENE STANJA TURBINSKIH VRATILA U ENERGETICI
 7. PROCENA POUZDANOSTI TURBINSKIH VRATILA
 8. PROCENA VEKA TRAJANJA VRATILA TURBINE
 9. ISTRAŽIVANJA PRIMENE MODELA DIJAGNOSTIKE TURBINSKIH VRATILA
 10. REZULTATI ISTRAŽIVANJA
 11. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA
 12. PREDLOG DALJIH ISTRAŽIVANJA
- LITERATURA
PRILOZI
BIOGRAFIJA

V VREDNOVANJE POJEDINIH DELOVA DOKTORSKE DISERTACIJE:

U **prvom poglavlju** su data uvodna razmatranja.

Drugo poglavlje predstavlja metodološki koncept istraživanja. Detaljno su obrazloženi: problem i predmet istraživanja, cilj istraživanja, hipoteze istraživanja, metode istraživanja, logistika i

organizacija istraživanja, naučna i društvena opravdanost istraživanja .

U **trećem poglavlju** su prikazana dosadašnja istraživanja i prikazani neki od korišćenih najznačajnijih radova iz oblasti modela dijagnostike sistema i njihovog uticaja na pouzdanost rada turbinskih vratila, energetske sistema. Posebno su naglašene prednosti kao i nedostaci postojećih modela čime je stvoren osnov za pravce sopstvenih istraživanja koja su usledila. Osim pregleda literature dat je i osvrt na doprinos obrazovnih institucija u zemlji istraživanju predmetne teme.

U **četvrtom poglavlju** su prikazani najvažniji parametri rada vezani za hidroelektranu „Đerdap II“ na kojoj se prati rad turbinskih vratila i „R3“ ležaja. Pored opisa hidroelektrane, njenog rada i opštih podataka, date su i tehničke karakteristike predmeta istraživanja potrebne za modeliranje.

U okviru **petog poglavlja** je predstavljen značaj održavanja i kontrole sistema. Hidroelektrana predstavlja jedan kompleksan sistem, a turbinska vratila su deo tog sistema. Zbog značaja koji hidroelektrane imaju za privredu i energetiku jedne zemlje potrebno je više pažnje posvetiti i kontinuirano vršiti merenja i istraživanja na proizvodnim sistemima. Opisan je sistem održavanja sa aspekta funkcija pouzdanosti raspoloživosti, gotovosti, troškova održavanja, pogodnosti održavanja itd. Osim prednosti koje se postižu sistemom održavanja prikazani su i domeni rezerviranja delova tehničkog sistema kao opcija održavanja turbina. Dijagnostika stanja sistema je posebno obrađena kao bitna komponenta za modelovanje dijagnostike turbinskih vratila. Pažnja je usmerena i na dijagnostičke parametre i njihovu klasifikaciju kao neophonost postavljanja modela dijagnostike. Zbog prirode potrebe da tehnički sistem konitnuirano i što duže neprekidno radi te logične potrebe da se neinvanzivno dijagnostikuje stanje vratila turbogeneratora posvećena je pažnja i postupcima kao i sredstvima tehničke dijanostike.

U **šestom poglavlju** predstavljeni su modeli dijagnostike koji se mogu primeniti u istraživanjima ali i u praktičnim merenjima i obračunima. Izloženi modeli dijagnostike se mogu primeniti i na primeru Hidroelektrane „Đerdap 2“ zajedno sa postupcima formiranja modela radi integralne slike. Na osnovu izloženog generisane su faze novog modela automatizovanog sistema. Izabrana je metoda pomoću primene neuronskih mreža koja pored nedostatka kao što je neizvesnosti uspeha ima niz prednosti. Mogu se istaći sledeće prednosti: ušteda vremena proračuna, otpornost na šumove dijagnostičkih merenja, mogućnost da model obuhvati i neidentifikovane faktore i uticaje, kao i mogućnost predviđanja stanja tehničkog sistema.

U **sedmom poglavlju** data je procena pouzdanosti turbinskih vratila. Osnovni parametar na osnovu koga je moguće izvesti procenu stanja, pouzdanosti i veka trajanja tehničkog sistema vratila turbogeneratora jeste dinamička izdržljivost prirubnice koja trpi mnogobrojna dinamička naprezanja usled aksijalnih pritisaka na radno kolo. Data su teorijska i praktična razmatranja koja se odnose na ovu problematiku u cilju dolaska do modela za održavanje odnosno preventivne kontrole i predviđanja otkaza rada turbinskih vratila. Zamor materijala kao fenomen koji se javlja u mašinskim elementima i materijalima u uslovima promenljivog opterećanja čiji je nivo značajno niži od projektovane čvrstoće u statičkim uslovima rasmatraan je kroz Velerov (Wöhler) dijagram na osnovu ispitivanja epruveta i pojave loma. Razmotreni su i faktori uticaja na dinamičku čvrstoću, te metode modeliranja prslina, metoda procene na osnovu deformacija i Pluvinagov metod. Činjenica da veštačke neuronske mreže mogu dati brze odgovore u realnom vremenu čini ih posebno podesnim za modelovanje (iako im je velika mana u dugom i neizvesnom procesu učenja koji se validira putem testova).

U **osmom poglavlju** je data procena veka trajanja vratila turbine. Na osnovu već sprovedenih istraživanja trajnosti i razloga otkaza vratila turbogeneratora u HE „Đerdap 2“, izvedeni su proračuni na bazi metoda Valerove krive i metoda konačnih elemenata. Dato je razmatranje ovih metoda sa akcentom na nedostatke koji impliciraju teškoće u primeni, a koje su iskorišćene kao osnov da se formira i prezentuje model dijagnostike stanja tehničkog sistema vratila turbogeneratora na bazi veštačke neuronske mreže. Na bazi dijagnostičkih merenja izvršena je i kvantifikacija koeficijenata dinamičke izdržljivosti tokom perioda eksploatacije.

U **devetom poglavlju** su prikazana istraživanja primene modela dijagnostike turbinskih vratila na bazi modela dijagnostike stanja vratila turbogeneratora.

Data je analiza otkaza i dijagnostičkih postupaka koji su uzeti kao deo modela. Razlikuju se 4 osnovne faze eksploatacije od novog stanja do loma vratila koje su kvantifikovane kao vrednosti koeficijenta dinamičke izdržljivosti. Ove vrednosti su interpolirane kako bi se dobila opštija slika o kretanje dinamičke izdržljivosti svakog vratila posebno.

Prvi je prezentovan **model procena stanja vratila turbogeneratora na bazi jednslojne ANN (Artificial Neural Network)** kao najjednostavniji i samim tim polazna osnova daljeg rada. Model je determinisan kroz korake određivanja arhitekture ANN i matrice ulaznih i izlaznih parametara. Određivanjem broja neurona u jednoslojnom mreži definisan je i njen konačni oblik nakon čega su obavljeni trening i testiranje ANN.

Drugi je prezentovan **model procene i predikcije stanja vratila turbogeneratora na bazi MLP (Multilayer Perceptron) Artificial Neural Network**. Model je takođe definisan određivanjem arhitekture ANN. Prikazani su parametri treninga i testiranja nakon čega je prikazan složeni postupak određivanja broja neurona po slojevima putem traženja minimalnih odstupanja selekcionih instanci. Po završenim testiranjima dobijena je konačna struktura ML ANN u obliku 7 : 13 : 10 : 7 : 2 : 1. Nakon toga pristupljeno je treningu neuronske mreže. Na osnovu vrednosti Final selection loss dobijene su konačne vrednosti težinskih koeficijenata pri čemu je ML ANN prezentovana kao validan model.

Treći je prezentovan **model procene i predikcije stanja vratila pojedinačnog agregata HE Đerdap 2 na bazi ML (Multilayer) Artificial Neural Network**. Model je prikazan kao jednostavnije struktura ANN koja može da pruži brži odgovor za manje opšte rešenje, tj da li se može proceniti i predvideti stanje vratila pojedinačnog turbogeneratora. Broj neurona u slojevima ANN je najpre tražen putem metode geometrijske piramide koji je Masters 1993. godine promovisao. Nakon toga eksperimentisano je sa jedankim brojem neurona po slojevima ali sa promenljivim brojem slojeva. Primenom postupka iz prethodnog modela uz ograničenje broja neurona po sloju dobijena je mnogo povoljnija vrednost „minimum selection loss“ parametra te je ovaj metod doprineo najpovoljnijoj arhitekturi ML ANN koja je bila oblika 7 : 7 : 4 : 2 : 1

U **desetom poglavlju** su prikazani rezultati istraživanja. Rezultati istraživanja nedvosmisleno ukazuju na prednosti modelovanja putem neuronskih mreža i pored svih teškoća određivanja njihove topologije koja je prikazana u eksperimentalnog delu. Osim procene stanja tehničkog sistema

modeli su ilustrovali i značajne mogućnosti prognostike.

Za prvi **model procene stanja vratila turbogeneratorsa na bazi jednslojne ANN** prikazano je grafički kretanje koeficijenta dinamičke izdržljivosti vratila C_{di} u zavisnosti proizvodnje električne energije. **Pri maksimalnoj zabeleženoj proizvodnji** otkaz – lom vratila bi se dogodilo u 18-oj godini. **Prema drugom scenariju** prosečne vrednosti proizvodnje otkaz vratila bi usledio u 21.oj godini proizvodnje. **Treći scenario** predstavlja minimalnu zabeleženu vrednost proizvodnje. Nakon 21 godine ovakva proizvodnja dovela je do vrednosti koeficijenta dinamičke izdržljivosti vratila $C_{di} = 0.600369$. Za svaki od 3 scenarija određene su i ukupne proizvodnje električne energije.

Za drugi **model procene i predikcije stanja vratila turbogeneratorsa na bazi MLP Artificial Neural Network** date su promene koeficijenta dinamičke izdržljivosti vratila C_{di} za različite scenarije proizvodnje električne energije turbogeneratorsa A6. **Prvi scenario** koji je neuronska mreža razmatrala jeste slučaj najveće zabeležene proizvodnje uzet iz baze podataka. Pri ovakvim uslovima umesto za 16 godina do loma vratila turbogeneratorsa A6 došlo bi 4 godine ranije. **Drugi scenario** je povećavanje svake godišnje proizvodnje iz baze za 5% proporcionalno po režimima rada. Ovakva proizvodnja dovela bi do otkaza vratila 3 godine ranije. **Treći scenario** podrazumeva minimalnu zabeleženu proizvodnju u bazi podataka tokom svake godine. Ovaj scenario eksploatacije dovodi do vrednosti koeficijenta dinamičke izdržljivosti vratila $C_{di} = 0.254862826$ na kraju 16-te godine eksploatacije kada je inače došlo do loma vratila. Na kraju su uporedo date ukupne proizvodnje električne energije za različite scenarije eksploatacije ali i godišnje proizvodnje električne energije za različite scenarije eksploatacije. Zaključak je da se višim nivoom eksploatacije dobije i veća prosečna godišnja proizvodnja iako je ukupna proizvodnja manja kada je nivo eksploatacije viši. Model neuronske mreže omogućuje planiranje proizvodnje u skladu sa energetskim potrebama i uvažavanjem nivoa istrošenosti vratila turbogeneratorsa.

Za treći **model procene i predikcije stanja vratila pojedinačnog agregata HE „Đerdap 2“ na bazi Artificial Neural Network** date su promene koeficijenta dinamičke izdržljivosti vratila C_{di} za različite scenarije proizvodnje električne energije turbogeneratorsa A5. **Podaci iz baze podataka** vrednosti koeficijenta C_{di} su linearno interpolirane od početne vrednosti 1 za novo vratilo do dijagnostički procenjene vrednosti $C_{di} = 0.525712125$ nakon 10 godina eksploatacije. **Prvi scenario** koji je neuronska mreža razmatrala jeste slučaj najveće zabeležene proizvodnje uzet iz baze podataka tokom jedne godine. Pri ovakvim uslovima vrednost koeficijenta $C_{di} = 0$ dostignuta je tokom 8. godine eksploatacije kada bi došlo do loma vratila. **Drugi ekstremni scenario** podrazumeva minimalnu zabeleženu proizvodnju u bazi podataka tokom svake godine. Ovaj scenario dovodi do vrednosti koeficijenta dinamičke izdržljivosti vratila $C_{di} = 0.590453291897617$ na kraju 10. godine eksploatacije. Za sve tri opcije prikazane su i vrednosti ukupne proizvodnje električne energije za različite scenarije eksploatacije kao i prosečne godišnje proizvodnje električne energije za sva 3 intenziteta eksploatacije. Kako bi se ustanovile i najbolje eksploatacione mogućnosti tehničkog sistema proračunate su i prikazane očekivane količine proizvedene energije za različite intenzitete eksploatacije za ceo životni vek vratila turbogeneratorsa A5.

U **jedanaestom poglavlju** su prikazana zaključna razmatranja. Nakon sprovedenih istraživanja pobrojani su svi glavni nedostaci dosadašnjih modela otklonjeni primenom veštačkih neuronskih mreža. Za svaki od 3 ANN modela dati su zaključci. Matematičke interpretacije modela ga čine jednostavnim za upotrebu u bilo kom softverskom paketu ili programskom jeziku i u tom kontekstu je dalja eksploatacija ovih modela jednostavna i predstavlja izuzetno visok nivo moguće implementacije.

Kao ključni rezultat istraživanja prikazan je **algoritam integralnog dijagnostičkog modela turbinskih vratila u energetici** koji podrazumeva integraciju sva tri ANN modela te povezanost sa budućim dijagnostičkim merenjima i dobijenim procenama.

Prikazani su naučni i društveni doprinos kroz mogućnosti predikcije otkaza vratila turbogeneratorskog sistema i procene preostalog radnog veka, pranje zastoja, zamena i slično.

Algoritam integralnog dijagnostičkog modela turbinskih vratila u energetici je kvalitativno novi metod koji objedinjuje sve modele istraživanja u ovoj disertaciji i generiše novu celinu koja je problem istraživanja dekomponovala na manje celine koje su zasebno rešene i time dale sinergiju mogućnosti u odnosu na modele koji su do sada imali istovetan pristup za različite probleme modelovanja.

Dokazivanje hipoteze izvedeno je pojedinačnim dokazivanjem pomoćnih hipoteza.

U **dvanaestom poglavlju** je dat predlog daljih istraživanja. Kao naredni koraci mogućih istraživanja navode se: primena integralno dijagnostičkog modela na sličnim tehničkim sistemima; uspostavljanje adekvatnih struktura neuronskih mreža za date tehničke sisteme prema dobijenim podacima; razvoj veštačke inteligencije u pravcu odabira adekvatne topologije ili njenih predloga kako bi se vreme eksperimentisanja znatno skratilo a prema kriterijumima vrste tehničkog sistema, konkretnih eksploatacionih uslova, vrste i količine dijagnostičkih parametara koji se prate, veličine setova podataka koji se mogu koristiti kao ulazni parametri neuronskih mreža itd.; promena u domenu edukativne komponente putem simulacije promene stanja tehničkog sistema vratila pod određenim uslovima eksploatacije i strategijom režima rada; razvoja takvog nivoa da bi veštačka inteligencija sama vršila zaključke u domenu primene određenih radnih režima spram proizvodnih zahteva i uslova i donosila odluke u potpunosti umesto ljudskog faktora.

U delu doktorata **Literatura** naveden je spisak od 190 literaturnih jedinica koje su korišćene tokom izrade doktorske disertacije.

VI. SPISAK NAUČNIH I STRUČNIH RADOVA

Koji su objavljeni ili prihvaćeni za objavljivanje na osnovu rezultata istraživanja u okviru rada na doktorskoj disertaciji.

Taksativno navesti nazive radova, gde i kada su objavljeni. Prvo navesti najmanje jedan rad objavljen ili prihvaćen za objavljivanje u časopisu sa ISI liste odnosno sa liste ministarstva nadležnog za nauku kada su u pitanju društveno-humanističke nauke ili radove koji mogu zameniti ovaj uslov do 01. 01. 2012. god. U slučaju radova prihvaćenih za objavljivanje, taksativno navesti nazive radova, gde i kada će biti objavljeni i priložiti potvrdu o tome.

1. **Ilić D.**, Milošević D., Jovanović Z., Cvjetković M., Vulić M., MLP ANN Condition Assessment Model of the Turbogenerator Shaft A6 HPP Đerdap 2, Tehnički vjesnik/Technical Gazette, Znanstveno-stručni časopis tehničkih fakulteta Sveučilišta u Osijeku/Scientific-professional Journal of Technical Faculties of University in Osijek, Slavonski Brod, Croatia, Vol. 28., No. 1, pp., Print: ISSN 1330-3651, Online: ISSN 1848-6339, DOI Number: 10.17559/TV-20190510052210, (Prihvaćen rad za objavljivanje), **M 23**
2. Kovacevic, M., Lambic, M., Radovanovic, Lj., Pekez, J., **Ilic, D.**, Nikolic, N., and Kucora, I., (2017) *Increasing the efficiency by retrofitting gas boilers into condensing heat exchanger*, Energy Sources Part B: Economics, Planning, and Policy, Vol. 12, No. 5, pp. 470 -479. ISSN 1556-7249, DOI: 10.1080/15567249.2016.1188182, **M 23**
3. Spasic, D., Radovanovic, Lj., **Ilic, D.**, Bursac, Z., Tolmac, J., Palinkas, I., (2017). *Application of the model recognition emergency sheet in order to increase the reliability of the plant in the energy sector*, Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy, 12:7, 635-645, DOI:10.1080/15567249.2016.1252810, ISSN: 1556-7249 (Print) 1556-7257 (Online) Journal homepage: Vol. 12, No. 7., **M23**
4. Mališić, V., **Ilić, D.**, Bekrić, D., Stamenović, M., Putić, S., (2015) Micromechanical crack analysis of glass-epoxy laminated composites subjected to tension load, *Zaštita materijala*, 56(4), pp. 421-428. ISSN 0351-9465, E-ISSN 2466-2585, **M24**
5. Cvjetković, M, **Ilić, D.**, Marinković, N., Development of competitiveness and business excellence of domestic enterprises, IV International symposium Engineering management and Competitiveness (EMC 2014), 20-21th Jun 2014., Zrenjanin, pp. 233-238. ISBN 978-86-7672-224-2, **M33**
6. **Ilić, D.**, Radovanovic, Lj., Cvjetković, M, Life management of power plants using non-destructive evaluation, VIII International Symposium Engineering management and Competitiveness (EMC 2018), 22-23th Jun 2018., Zrenjanin, pp. 95-101. ISBN: 978-86-7672-307-2, **M33**
7. **Ilić, D.**, M, Radovanovic, Lj., Cvjetković, M. The application of the maintenance method according to the condition with parameter control in the energy sector, VIII International Symposium Engineering management and Competitiveness (EMC 2018), 22-23th Jun 2018., Zrenjanin, pp. 101-107. ISBN: 978-86-7672-307-2, **M33**

VII ZAKLJUČCI ODNOSNO REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Rezultat ANN modela izloženog u radu je da pruža mogućnost predikcije stanja i otkaza vratila turbogeneratorskog u različitim eksploatacionim uslovima tj. režimima rada. ANN model omogućuje momentalne mogućnosti predikcije stanja i otkaza vratila što daje i prostora za razvoj modela na bazi dnevnih planova što bi pružilo još ažurnije informacije a pogotovu ako bi došlo do povezivanja sa monitoringom stanja vratila (vibrodijagnostika na primer). Na osnovu predikcije otkaza vratila stvaraju se mogućnosti optimizovanja broja i vremena planskih zastoja i preventivnih

akcija održavanja kao i boljeg ukupnog iskorišćenja tehničkog sistema turbogeneratora. U slučaju dobijanja novih dijagnostičkih podataka ili podataka o otkazima vratila moguće je lako izvršiti nove treninge neuronske mreže prema istim metodama i dobiti još preciznije mogućnosti predikcije otkaza. ANN model ima mogućnosti primene i za sve slične tehničke sisteme ovog tipa pri čemu bi se postupak modelovanja morao ponoviti radi dobijanja odgovarajućeg broja neurona u skrivenom sloju ali je prednost modela jednostavna metodologija determinacije strukture ANN. Dobijeni rezultati ukazuju na to da režim sa najvećim dinamičkim opterećenjem vratila daje najveću količinu električne energije u toku životnog veka tehničkog sistema. Ipak, u skladu sa realnim potrebama proizvodnje električne energije je neophodno i uskladiti intenzitet eksploatacije tehničkog sistema. Model je dao odgovor na to koje od strategija primene radnih opterećenja mogu dovesto do maksimizacije ukupne proizvodnje i time odrediti optimalnu strategiju proizvodnje prema broju raspoloživih agregata i uslovima proizvodnje.

Rezultat modela procena stanja vratila turbogeneratora agregata A6 na bazi MLP NN je stvorio široke mogućnosti. Brza mogućnost predviđanja potrošenosti vratila turbogeneratora na bazi različitih scenarija proizvodnje električne energije daje potencijal da se resursi iskoriste optimalno u odnosu na energetske potrebe. Posebna je prednost mogućnost da se trenutno bez gubitka vremena, proračuna i dobije procena stanja istrošenosti vratila i vremenska distanca od mogućeg loma prirubnice vratila usled dinamičkih udara vode. Jedna od ozbiljnih prednosti je mogućnost da se smanje zastoje a time i gubici prekobrojnih i nepotrebnih dijagnostika stanja vratila već da se optimizuje broj dijagnostičkih provera. Model je napravljen tako da se novim dijagnostikama stanja mogu korigovati vrednosti trening setova podataka i izvršiti nova mašinska učenja neuronske mreže na već utvrđenoj topologiji i time da se dobije još kvalitetnija informacija ukoliko bi se uslovi eksploatacije ili osobine tehničkog sistema promenile. Višeslonji model neuronske mreže je dobra osnova i za dalje primene u problematici otkaza vratila turbogeneratora. ML ANN daje značajno bolje rezultate od modela ANN s jednim skrivenim slojem. ML ANN je dao najbolje rezultate od svih ANN modela u disertaciji što se ogleda najmanjom vrednošću parametra **final selection loss** nakon sprovedenog treninga neuronske mreže od **0.00363**.

Model procene i predikcije stanja vratila pojedinačnog agregata HE Đerdap 2 na bazi ML ANN je uz najduže vreme sprovođenja eksperimenta dao optimalnu strukturu ML ANN sa najmanjim brojem neurona koji mogu da odgovore na zahtev procene i predikcije samo jednog turbogeneratora. Rezultat modela procena stanja vratila turbogeneratora agregata A5 na bazi ANN je stvorio široke mogućnosti kao što su planiranje proizvodnje u skladu sa energetske potrebama i uvažavanjem nivoa istrošenosti vratila turbogeneratora. Brza mogućnost predviđanja istrošenosti vratila turbogeneratora na bazi različitih scenarija proizvodnje električne energije daje potencijal da se resursi iskoriste optimalno u odnosu na energetske potrebe. Implementacijom modela moguće je smanjiti zastoje, a time i gubitke prekobrojnih i nepotrebnih dijagnostika stanja vratila putem optimizacije broja dijagnostičkih provera.

Novim dijagnostikama stanja mogu se korigovati vrednosti trening setova podataka i izvršiti nova mašinska učenja neuronske mreže na postojećoj topologiji. Dosadašnji nivo eksploatacije mnogo je bliži strategiji minimalnog nivoa eksploatacije i omogućuje 2979 MW ukupno proizvedene električne energije tokom čitavog radnog veka vratila. Intenzivnija eksploatacija značajno smanjuje radni vek vratila, ali je i nivo godišnje proizvodnje viši što je značajno kada postoji imperativ veće proizvodnje. Veći broj agregata omogućuje viši nivo proizvodnje električne energije a sa manjim intenzitetom istrošenosti pojedinačnih vratila i ukupno većim nivoom proizvodnje po agregatu za ceo radni vek vratila. Model je odlično rešenje u odnosu na potrebu procene i predikcije stanja samo jednog vratila turbogeneratora i kada postoji takva potreba ova topologija ili eventualno mesto pronalaska iste su optimalni za primenu. Njegov parametar **final selection loss** nakon sprovedene obuke mreže iznosi **0.037389** što ga čini drugim najboljim

modelom, premda ograničenim na samo jedan agregat.

Matematičke interpretacije modela ga čine jednostavnim za upotrebu u bilo kom softverskom paketu ili programskom jeziku i u tom kontekstu je dalja eksploatacija ovih modela lako dostupna širem broju inženjera i održavalaca bez posebnih informatičkih znanja. Čak i jednostavna implementacija u MS Excel ili MathLab omogućuju automatizaciju i trenutno dobijanje svih rezultata.

Generisani modeli kao i ostali ANN modeli imaju visoku otpornost na šumove i nedovoljno dobru dijagnostiku ili procenu parametara koja prethodi testiranjima ali je možda najveći nedostatak određivanje topologije mreže za druge tehničke sisteme koje traži i određenu obučenost kadrova. Sa druge strane ovo istraživanje je doprinelo tome da se izučavanjem ove teme daje metodološki okvir za odabir modela i određivanje topologije bez lutanja. U okviru toga moguće je generisati jedinstven algoritam koji može biti pomoć u budućim istraživanjima te preporuka primene ovakvih modela na slične ili druge tehničke sisteme. U slučaju da se ima više vremena za modelovanje, postavlja se pitanje da li je potrebno modelovati sistem jednog ili više turbinskih vratila. Ako se radi o jednom onda se pribegava ML ANN modelu koji je u istraživanju primenjen na agregatu A5, a u suprotnom ML ANN modelu koji je imao najbolje rezultate ali i najsloženiju strukturu. Nakon primene odgovarajućeg modela i dobijanja rezultata sledi nivo donošenja odluka o proizvodnji, akcijama održavanja i dijagnostičkim postupcima. Nakon toga dijagnostičkim postupcima se prikupljaju novi podaci koji pomažu primenu nekog od ranije razvijenih modela ili u skladu sa mogućnostima da se ponove istraživanja u cilju nalaženja optimalnog modela neuronske mreže.

VIII OCENA NAČINA PRIKAZA I TUMAČENJA REZULTATA ISTRAŽIVANJA

Eksplicitno navesti pozitivnu ili negativnu ocenu načina prikaza i tumačenja rezultata istraživanja.

Doktorska disertacija MSc Ilić Dragoljuba „*Integralni pristup razvoju modela dijagnostike turbinskih vratila u energetici*” je rezultat eksperimentalnih i numeričkih istraživanja u oblasti pouzdanosti.

Izlaganje u ovoj disertaciji u potpunosti je vezano za cilj istraživanja u skladu sa obrazloženjem navedenim u prijavi disertacije. Rezultati su prikazani sistematično, jasno i pregledno, uz više prikaza tabelarno, grafički, numerički i tekstualno i pri tome su upoređivani. Način obrade dobijenih rezultata istraživanja ukazuje na adekvatan prikaz i tumačenje ostvarenih rezultata.

Relevantna naučna literatura koja je korišćena u disertaciji je prikazana na korektan način, sa potrebnim citiranjem i interpretacijama.

Doktorska disertacija je proverena u softveru za detekciju plagijarizma iThenticate.

Saglasno ovim činjenicama, Komisija pozitivno ocenjuje način na koji je kandidat prikazao i tumačio dobijene rezultate istraživanja i smatra da u potpunosti odgovara karakteru problema koji je u ovoj disertaciji rešavan.

IX KONAČNA OCENA DOKTORSKE DISERTACIJE:

Eksplícitno navesti da li disertacija jeste ili nije napisana u skladu sa navedenim obrazloženjem, kao i da li ona sadrži ili ne sadrži sve bitne elemente. Dati jasne, precizne i koncizne odgovore na 3. i 4. pitanje.

1. Da li je disertacija napisana u skladu sa obrazloženjem navedenim u prijavi teme?

Doktorska disertacija kandidata MSc Ilić Dragoljuba „*Integralni pristup razvoju modela dijagnostike turbinskih vratila u energetici*” je napisana u skladu sa obrazloženjem koje je navedeno u prijavi teme.

2. Da li disertacija sadrži sve bitne elemente?

Doktorska disertacija svojim naslovom, sadržajem, rezultatima istraživanja i načinom tumačenja tih rezultata sadrži sve bitne elemente koji karakterišu naučno-istraživački rad.

3. Po čemu je disertacija originalan doprinos nauci?

Naučni doprinos teorijskih istraživanja ove doktorske disertacije se ogleda u tome da je prikupljanjem i proučavanjem relevantne domaće i strane literature izvršena sinteza brojnih saznanja koja je omogućila da se uoče nedostaci postojećih modela i da se ostvari integralni pristup modelovanju.

Modeli neuronskih mreža predstavljeni u disertaciji su dali 3 glavna pristupa razvoja u koracima modelovanja stanja vratila turbogeneratora tokom eksploatacije. Prvi pristup se odnosi na jednoslojnu neuronsku mrežu, kakvi se i najčešće primenjuju i otuda je neophodnost bila imati ovakav pristup. Drugi je znatno složeniji pristup modelovanja stanja tehničkog sistema putem višeslojne neuronske mreže kod kojih je praktično duži istraživački proces uvek prisutan, pa je ovde doprinos nauci značajniji i dat je veći istraživački potencijal. Treći pristup koji se odnosi na modelovanje samo jednog agregata je interesantan sa aspekta lakšeg razvoja višeslojnih neuronskih mreža.

Stvorena je mogućnost primene modela na bilo kojoj softverskoj platformi ili programskom jeziku, jer je dobijen matematički izraz i primena je univerzalna. Primena računarskih tehnologija i automatizacija upotrebe dobijenih dijagnostičkih parametara kao inputa u model bi mogla da pruži velike mogućnosti u domenu daljih naučnih istraživanja.

Kao originalni naučni doprinos ove disertacije formiran je algoritam integralnog dijagnostičkog modela turbinskih vratila u energetici. Ovaj integralni model objedinjuje sva tri modela stanja vratila turbogeneratora. Algoritam može da predstavlja osnov daljih istraživanja u domenu tehnologije održavanja, dijagnostike stanja i procene pouzdanosti tehničkih sistema. Posebnu stavku naučnog doprinosa predstavlja potencijal da se putem mogućih višekriterijumskih simulacija vrši obuka održavalaca u privredi, kao i edukacija studenata u akademskom radu.

5. Nedostaci disertacije i njihov uticaj na rezultat istraživanja.

Nisu uočeni nedostaci disertacije.

Posebno napominjemo da je ova doktorska disertacija prošla proveru na plagijarizam, uz primenu softvera iThenticate.

X PREDLOG

Na osnovu ukupne ocene disertacije Komisija predlaže da se doktorska disertaciju pod nazivom „*Integralni pristup razvoju modela dijagnostike turbinskih vratila u energetici*” prihvati, a da se kandidatu **MSc Ilić Dragoljubu** odobri javna odbrana disertacije.

Datum:

POTPISI ČLANOVA KOMISIJE

Prof. dr Branko Škorić, redovni profesor
Predsednik komisije

Prof. dr Dragan Milošević, vanredni profesor
Član 1

Prof. dr Desnica Eleonora, vanredni profesor
Član 2

Prof. dr Jasmina Pekez, vanredni profesor
Član 3

Prof. dr Ljiljana Radovanović, vanredni profesor
Mentor

To:

Your ref.:
Our ref.: AA-TV-20190510052210

Slavonski Brod, 03-06-2020

Subject: **Acceptance of Article**
Article ID: **TV-20190510052210**
DOI Number*): **10.17559/TV-20190510052210**
Title: **MLP ANN Condition Assessment Model of the Turbogenerator Shaft A6 HPP Đerdap 2**
Author/s: **Dragoljub ILIĆ, Dragan MILOŠEVIĆ, Zoran JOVANOVIĆ, Milena CVJETKOVIĆ, Miroslav VULIĆ***

Dear authors!

Your article (mentioned above) has been accepted for publication in the journal Tehnički vjesnik/Technical Gazette (Print: ISSN 1330-3651, Online: ISSN 1848-6339), Vol. 28/No. 1 to be published towards the end of **February 2021**. The article is classified as **preliminary communication**. The Journal indexed in Web of Science (Science Citation Index Expanded), Journal Citation Reports (IF = 0,644 for 2018), Scopus, INSPEC, Compendex, Geo Abstracts etc.

Attached is the Copyright Transfer Agreement with Payment Data. Please read carefully the enclosed Copyright Transfer Agreement with Payment Data and if you agree with the given terms fill in the necessary data, sign the form, keep a copy for yourself and send the original to our address by regular mail (also e-mail a copy to tehnvj@sfsb.hr or send a fax to +385 35 446 446).

When we have received the Copyright Transfer Agreement, your article will be published in the Journal.

Yours sincerely,

Editor-in-Chief:
Prof. dr. Pero Raos



STROJARSKI FAKULTET U SLAV. BRODU
SLAVONSKI BROD OIB 65410788616
Tel: 035 446 446 Fax 035 446 446

Enclosed documents:

- Copyright Transfer Agreement and Payment Data