

Kratkoročno predviđanje vibracionog ponašanja Fransijske turbine nakon višedecenijske eksploatacije

Short-Term Prediction of Francis Turbine Vibration Behavior after Decades of Operation

Jovana Petrović, Ivan Božić

Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet

Rezime - Savremeni pristupi u prognoziranju i sprečavanju havarije, smanjenju broja i dužine trajanja zastoja, otkrivanju i praćenju otkaza u stvarnim višedecenijskim pogonskim uslovima hidroagregata, zasnivaju se na vibrodijagnostici. Multidisciplinarnost takvih pristupa ogleda se u identifikaciji pojedinih vibracija u hidroagregatima, primeni različitih vibrodijagnostičkih metoda, oceni kvaliteta izmerenih podataka, analizi i predikciji zasnovanih na veštačkoj inteligenciji. U radu je prikazan jedan od mogućih pristupa rešavanja kompleksne problematike predviđanja ponašanja jedne hidraulične turbine koja je u eksploataciji više od pola veka. Za kratkoročno predviđanje apsolutnih i relativnih vibracija razvijen je odgovarajući algoritam korišćenjem veštačkih neuronskih mreža. Dobijeni rezultati su prikazani u zavisnosti od različitih eksploatacionih uslova.

Ključne reči - Fransijska turbina, vibracione karakteristike, predikcija, neuronske mreže

Abstract - Contemporary approaches in forecasting and preventing accidents, reducing the number and duration of downtimes, detecting and monitoring the failures in the real decades-long operating conditions of units in hydropower plants, are based on vibrodiagnostics. The multidisciplinary character of such approaches is reflected in the identification of certain vibrations in the hydro-aggregates, the application of various vibrodiagnostic methods, the quality assessment of measured data, as well as analysis and prediction based on artificial intelligence. The paper presents one of the possible approaches to solving the complex problem of predicting the behavior of a hydraulic turbine that has been in operation for more than half a century. An appropriate algorithm using artificial neural networks has been developed for short-term prediction of absolute and relative vibrations. The obtained results are presented depending on various operating conditions.

Index Terms - Francis turbine, vibration characteristics, prediction, neural networks

I UVOD

Merenje i analiza mehaničkih vibracija je, zbog svoje pouzdanosti, najčešće upotrebljavana tehnika detekcije i lokalizacije oštećenja rotirajućih mašina. U odnosu na druge metode ispitivanja bez razaranja, kontinualni monitoring vibracija pruža dovoljno informacija o stanju delova sistema, čime se sprečava brzo širenje oštećenja i pojava havarijskog otkaza.

Često vrlo male i u početku zanemarljive vibracije mogu pobuditi rezonanciju nekih drugih delova strukture i mogu se pojačati do te mere da postanu glavni i vrlo ozbiljan izvor buke i značajnih vibracija. Istraživanjem problema vibracija kod rotirajućih mašina došlo se do zaključka da je veliki broj problema vibracija uzorkovan malim brojem uzoraka, od kojih su najčešći debalans, nesaosnost i rezonanca [1]. Jasnim definisanjem stanja rada turbogeneratorskog sistema, u [2] je data mogućnost formiranja analize stabla otkaza sastavnih komponenta mašinskog sistema. Detaljno istraživanje vibracija u hidroagregatima, uzroci njihovog nastanka kao i promene stanja i karakteristika hidrauličnih turbina usled vibracija dato je u [3].

S druge strane, u cilju ocene vibracionog stanja hidroturbine i automatizacije vibrodijagnostičkih metoda sve je češća upotreba metoda veštačke inteligencije (VI) [4,5].

Primena veštačke neuronske mreže (VNM) za kratkoročno predviđanje vibracija jednog hidroagregata data je u [6], gde su za ulazne uticajne parametre (kota akumulacije, snaga generatora, pritisci u spirali i cevovodu, temperature nosećeg i vodećeg ležaja) razvijeni modeli predikcije relativnih i apsolutnih vibracija vratila u zoni gornjeg vodećeg ležaja i apsolutnih vibracija kućišta turbinskog ležaja.

Upravo su u nastavku ovog rada prikazani neki od rezultata primene VNM za kratkoročno predviđanje vibracionog ponašanja hidroagregata koji je u višedecenijskoj eksploataciji.

II VIBRACIJE U HIDROAGREGATIMA

Savremeni sistemi za monitoring rada hidroelektrana prikupljaju podatke i obrađuju sve neophodne veličine u procesu upravljanja i zaštita hidroagregata. Uopšteno, upravljanje i kontrola rada agregata (turbina i generator) se sastoji od:

- kontrole mašine sa stanovišta optimalnog korišćenja agregata;
- opšteg stanja agregata sa stanovišta održavanja;
- načina otkrivanja mogućih otkaza;
- analize, dijagnostike i trenda otkrivenih otkaza.

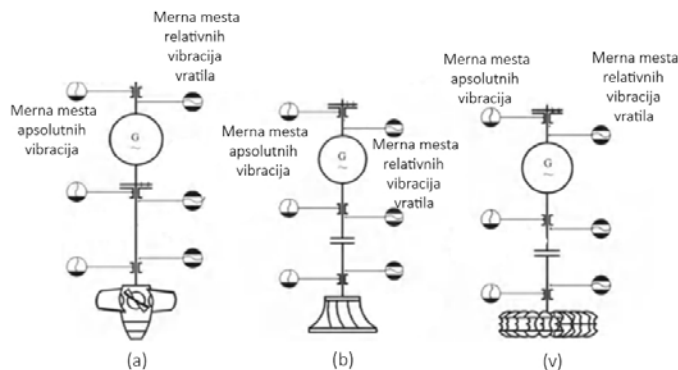
Vibracije u hidrauličnim turbinama, prema uzroku njihovog nastanka, su raznovrsne, ali su najčešće posledica:

- protoka kroz turbinu (turbulentno strujanje u kompleksnoj geometriji strujnog prostora sa neuniformnim i nestacionarnim karakterom);
- nestabilnosti protoka (pri normalnim prelaznim režimima ili pri ustaljenom radu agregata u parcijalnim režimima opterećenja);
- kavitacije;
- hidroelastičnih vibracija (posledica geometrije obrtnog kola, tj. hidrauličnih profila lopatica obrtnog kola);
- karakteristika konstrukcije turbine i njenih pojedinih sklopova i mehaničkih delova.

U cilju određivanja vibracionog stanja i rada generatora, prate se vibracije kućišta statora, jezgra statora, kućišta vodećeg (radijalnog) ležaja, kućišta nosećeg (aksijalnog) ležaja i dr.

Kontinualnim monitoringom i analizom vibracija celokupnog hidroagregata u toku eksploatacije se prati njegovo stvarno stanje i utvrđuju promene koje blagovremeno definišu potrebne aktivnosti preventivnog održavanja.

Različiti tipovi i specifičnosti konstrukcija hidrauličnih turbina, koji su ugrađeni u takve agregate, uslovljavaju zaseban vibrodijagnostički pristup. Nezavisno od tipa konvencionalnih turbina, uobičajena merna mesta za kontinualno merenje vibracija prikazana su na slici 1 [7].

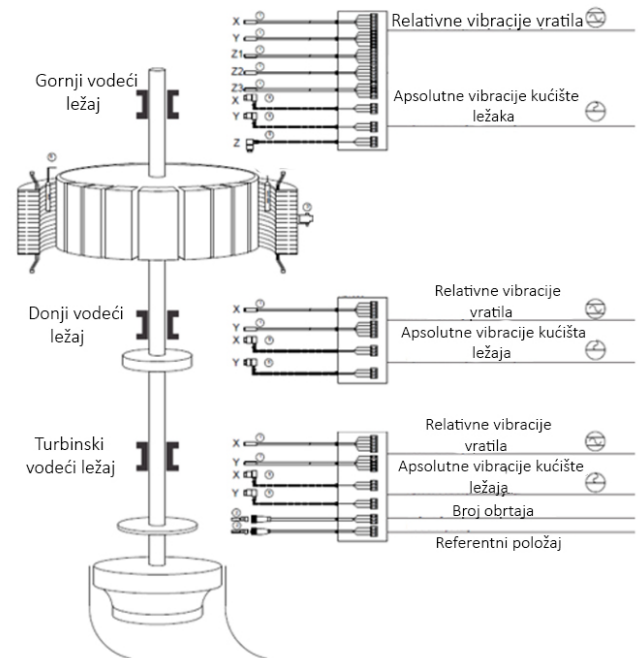


Slika 1. Merna mesta vibracija različitih tipova turbina:
a) Kaplan turbina; b) Fransis turbina; c) Pelton turbine

Merenja se obavljaju kako na nepokretnim delovima agregata (merenje apsolutnih vibracija kućišta ležajeva i generatora, glava namotaja, magnetnog kola) i na njenim obrtnim delovima (relativne vibracije vratila). Za jednu Fransis turbine principijalna šema merenja vibracija data je na slici 2.

Pored kontinualnog (on-line) merenja u realnom vremenu rada agregata, vrše se i periodična (off-line) ispitivanja na mašini koja

je zaustavljena. Analiziranje stanja i vibrodijagnostičkog ponašanja agregata zavisi od kvaliteta dobijenih rezultata pri ispitivanju u ustaljenim i prelaznim režimima (puštanje u rad, kočenje pri zaustavljanju, zaletanje pri naglom rasterećenju), ali i pri različitim toplotnim stanjima mašine i pri uslovima rada (obrtanje u nepobuđenom stanju, prazan hod pobuđena mašina, sinhronizacija, različiti režimi opterećenja).



Slika 2. Principijalna šema merenja vibracija na hidroagregatu sa Fransis turbinom [8]

III VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE ZA KRATKOROČNO PREDVIĐANJE

U cilju planiranja pouzdane eksploatacije hidroelektrana i donošenja pravovremenih odluka pri njihovom održavanju, predviđanje vibracionog ponašanja hidroagregata može biti od izuzetne koristi. Upravo takve predikcije na osnovu realnih postojećih arhiviranih podataka iz proizvodnje omogućuju upravljanje rizikom od otkaza svakog hidroagregata.

Metoda VNM je tehnika računarske inteligencije koja se zasniva na sistemu za obradu informacija ljudskog mozga, a koji se mogu koristiti kao alternativna metoda za inženjerske analize i predviđanja [9].

U skladu sa sve većom savremenom primenom VI u raznim domenima tehnike, kao i njenih razvijenih modela za raznovrsne predikcije, i u hidroenergetskoj praksi se VI pokazala kao pouzdan alat, posebno imajući u vidu stohastični karakter brojnih radnih parametara.

Metode VI za višenamenske predikcije se zasnivaju na istorijskim podacima merenih i radnih parametara, pa se, i predviđanjem određenih vibracionih veličina može blagovremeno sprečiti poremećaj rada hidroagregata, a takođe veća oštećenja i havarije.

Upravo prednosti primene VNM se ogledaju u njihovim sposobnostima samoučenja, te se predviđanje realizuje kao predviđanje budućeg ponašanja na osnovu ponašanja iz prošlosti. Među raznovrsnim merenim podacima obično ne postoje jasne funkcionalne veze, te su višeparameterske relacije i predviđanja jedino mogu utvrditi pomoću VI.

VNM predstavljaju sistem međusobno povezanih elemenata, neurona, koji se sposoban da definisanim metodama uči, aproksimira funkciju zavisnosti ulaznih i izlaznih veličina na osnovu predočenih obučavajućih parova [9].

Za obučavanje VNM potrebno je formirati obučavajuće parove, korišćenjem prikupljenih podataka. Za dobijanje što boljih rezultata, tj. mreža koja će generisati najmanju grešku potrebno je varirati parametre algoritma učenja, arhitekture mreže, aktivacionu funkciju itd.

Povećavanjem broja skrivenih slojeva i neurona u skrivenim slojevima ima svojih prednosti i mana. Povećanjem broja skrivenih slojeva i neurona rezultuje boljom sposobnošću generalizacije VNM. Međutim, kod obučavanja neuronskih mreža, veoma je važna brzina obučavanja, odnosno brzina konvergencije koja se smanjuje sa povećanjem broja skrivenih slojeva i neurona u skrivenim slojevima [10].

U nastavku rada je prikazana jedna od mogućnosti primene VNM za procenu dinamičkog ponašanja agregata koji je više od pola veka u eksploataciji. Na osnovu arhiviranih podataka merenih apsolutnih i relativnih vibracija u pogonu, razvijen je odgovarajući model predikcije i prikazani dobijeni rezultati uzimajući u obzir dominantne uticajne parametre.

IV KRATKOROČNO PREDVIĐANJE VIBRACIONOG PONAŠANJA FRANSIS TURBINE

Za predviđanje vibracije razvijen je model prikazan na slici 3 i primenjen za agregat A u HE „Vrla 3“, koja se nalazi u sistemu Vlasinskih hidroelektrana [11].

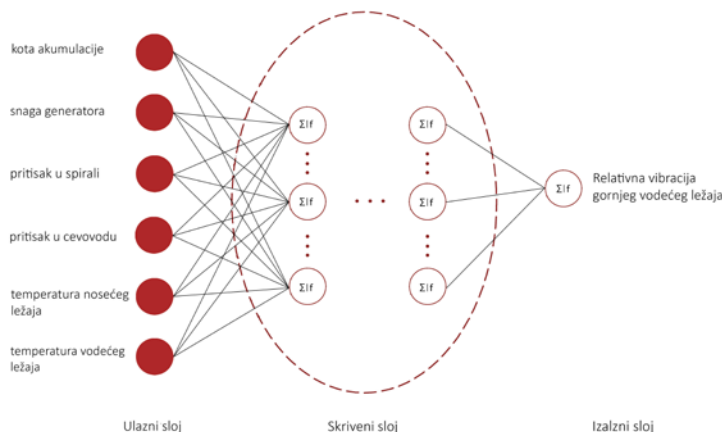
Tabela 1. Tehničke karakteristike hidroelektrane „Vrla 3“

HE Vrla 3	
Instalisana snaga HE	28,95 MW
Instalisani protok HE	18,4 m ³ /s
Agregat A - turbina	
Tip	Fransis
Nominalna snaga	13,5 MW
Maksimalni pad	192,3 m
Minimalni pad	168,3 m
Nominalni protok	8,5 m ³ /s
Prečnik obrtnog kola	2 m
Agregat A - generator	
Prividna snaga	16 MVA
Sinhrona brzina obrtanja	600 o/min
Faktor snage	0,9

Osnovne karakteristike hidroelektrane i razmatranog hidroagregata su prikazane u tabeli 1.

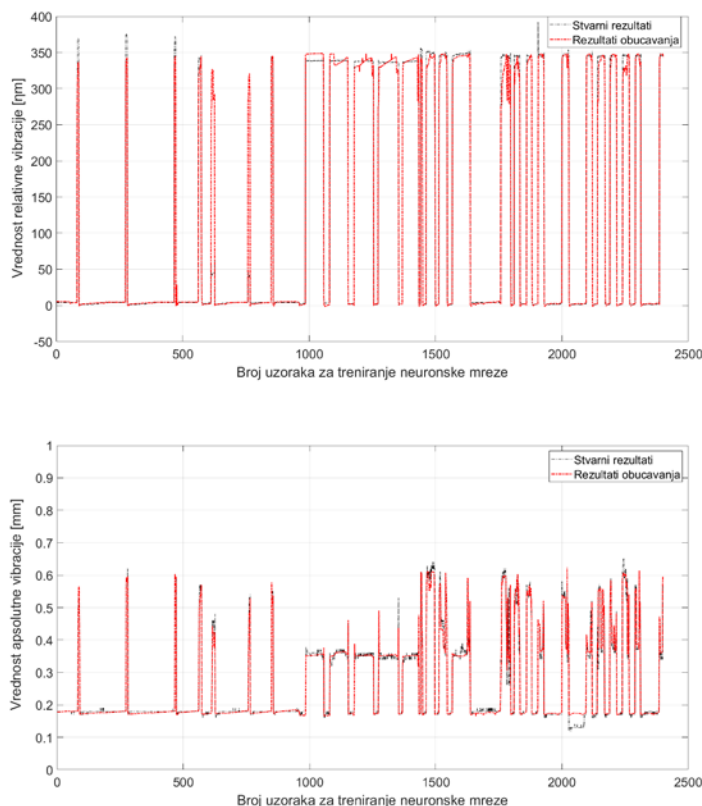
Arhitektura mreže za kratkoročno predviđanje sa ulaznim

podacima data je na slici 3. Zbog jednostavnosti prikaza arhitektura je predstavljena u uprošćenom obliku, dok se realna mreža sastoji od 9 skrivenih slojeva.



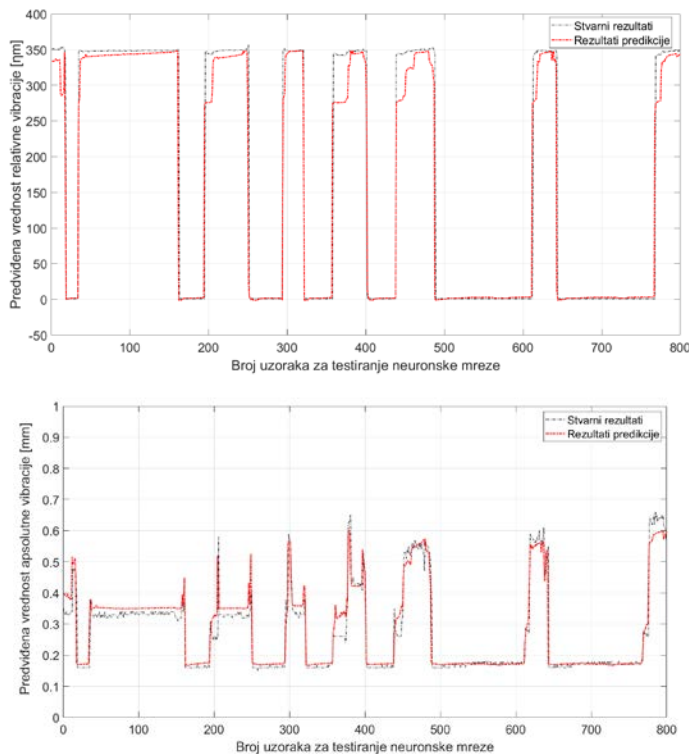
Slika 3. Arhitektura veštačke neuronske mreže

Detaljna istraživanja, razvoj modela i rezultati predikcije pojedinih vibracionih parametara prikazani su u [6], a u nastavku je dat primer obučavanja VNM za kratkoročno predviđanje relativnih vibracija gornjeg vodećeg i apsolutnih vibracija turbinskog ležaja (slika 4).



Slika 4. Rezultati treniranja veštačke neuronske mreže za kratkoročno predviđanje relativnih i apsolutnih vibracija

Na apscisi prikazanih dijagrama nalazi se broj uzorka za treniranje (obučavanje) neuronske mreže, dok se na ordinatama nalaze vrednosti relativnih i apsolutnih vibracija, respektivno. Odstupanja koja se uočavaju između obučanih vrednosti vibracija u odnosu na stvarne vrednosti su u zoni očekivane greške i kao takva su prihvatljiva.



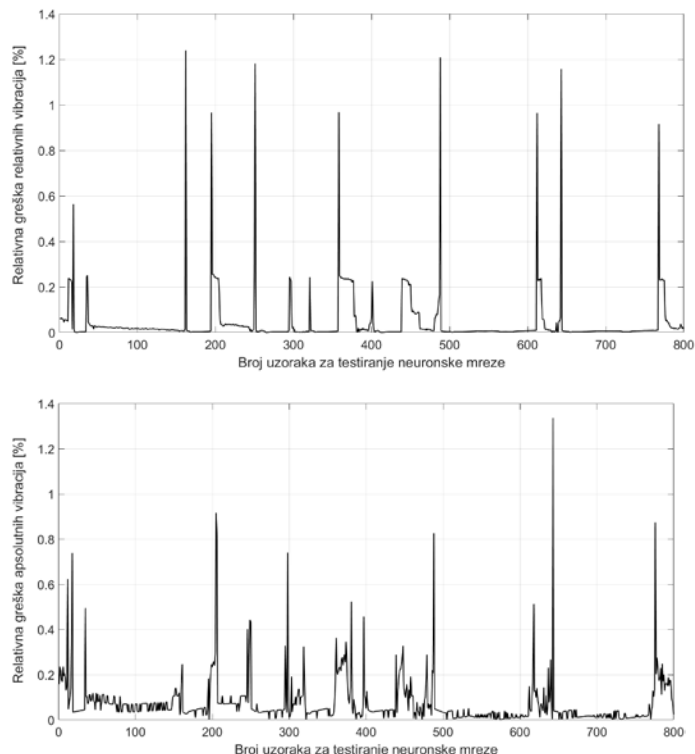
Slika 5. Rezultati testiranja veštačke neuronske mreže za kratkoročno predviđanje relativnih i apsolutnih vibracija

Na slici 5 prikazani su rezultati testiranja obučene mreže za podatke koji nisu obuhvaćeni treniranjem. U cilju kratkoročnog predviđanja relativnih i apsolutnih vibracija uočava se dobra obučenost mreže i trendovi promene vibracija za posmatrani period. U tabeli 2 su, pomoću vrednosti MAPE, MAE i RMSE, prikazane ocene obučenosti mreže, kao i kvaliteta njene primenljivosti za kratkoročne predikacije razmatranih vibracija.

Tabela 2. Greške predikcije

		MAPE [%]	MAE	RMSE
Relativne vibracije vratila u zoni gornjeg vodećeg ležaja	Treniranje	0.0328	0.0038	0.6325
	Test	0.0779	0.0052	0.7839
Apsolutne vibracije kućišta turbinskog ležaja	Treniranje	0.016	0.00017	0.00044
	Test	0.09	0.0092	0.0013

Na slici 6 je grafički predstavljena relativna greška testiranja veštačke neuronske mreže za kratkoročno predviđanje pomenutih relativnih i apsolutnih vibracija. Maksimalna relativna greška predikcije i relativnih i apsolutnih vibracija ne prelazi 1,5%, što ukazuje na pouzdanost primene razvijenih modela za kratkoročno predviđanje.



Slika 6. Rezultati relativne greške testiranja veštačke neuronske mreže za kratkoročno predviđanje relativnih i apsolutnih vibracija

Neophodno je istovremeno istaći i da su vrednosti apsolutnih vibracija turbinskog ležaja zadovoljavajući za dugotrajni rad, tj. prema standardu ISO 10816-5, za broj obrtaja 600 o/min, ove vibracije pripadaju grupi B [12]. S druge strane, vrednosti relativnih vibracija gornjeg vodećeg ležaja svrstavaju razmatrani hidroagregat u grupu C (standard ISO 7919-5) tj. u mašine sa nezadovoljavajućim vibracijama za kontinualni dugotrajni rad. Prethodno navedeno ukazuje da je za razmatrani hidroagregat sa Fransis turbinom, koji je u višedecenijskoj eksploataciji, praćenje i predikcija njegovog vibracionog ponašanja od izuzetnog značaja i da prikazana metodologija ima svoju veliku praktičnu primenljivost.

V ZAKLJUČAK

Dalje usavršavanje algoritma za predikciju vibracionog ponašanja hidroagregata u eksploataciji, ali i ostalih karakteristika hidrauličnih turbine može podići pouzdanost cele hidroelektrane. Kvalitetne predikcije budućeg ponašanja hidroagregata smanjuju njihov eventualni zastoj ili havariju, ali i doprinose donošenju pravovremenih odluka o počecima njihove modernizacije i revitalizacije.

Primena i značajnost predviđanja vibracija hidroagregata koristeći VNM ogleđa se u tome da je i pored predviđanja samih vibracija, moguće predvideti uzroke njihovih pojava, kao i ponašanje vibracija sa promenom uticajnih faktora. Analize dobijenih rezultata i dostupnih savremenih metoda zasnovanih na veštačkoj inteligenciji pokazuju svrsishodnost razvijenog algoritma, ali i mogućnost za njegov dalje unapređivanje.

ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije i Javnom preduzeću "Elektroprivreda Srbije", ogranak HE Đerdap - Vlasinske hidroelektrane.

LITERATURA

- [1] Criqui, A.F. False and misleading sources of vibration, in Proc, *23rd Turbomachinery Symposium*, Texas A&M University. Turbomachinery Laboratories, pp. 137-150, 1994. <https://doi.org/10.21423/R1VQ1N>
- [2] Hartog, D. *Vibracije u mašinstvu*, Beograd, 1972.
- [3] Jiang, H., Dong, S., Liu, Z., He, Y., Ai, F. Performance Prediction of the centrifugal compressor based on a limited number of sample data, *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 5954128 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5954128>
- [4] Владиславлев, Л.А., *Вибрация гидроагрегатов гидроэлектрических станций*, Энергия, Москва, 1972. http://lib.hydropower.ru/books/doc_00031382.pdf
- [5] Šaranović, I., Janković, N. Dijagnostika vibracionog stanja hidroturbina primenom koncepta veštačke inteligencije, in Proc. *Međunarodni simpozijum Infoteh Jahorina*, 2002.
- [6] Cvetković, D., Prašćević, M. *Buka i vibracije*, Fakultet zaštite na radu, Niš, 2005.
- [7] Petrović J. *Predikcija vibracionih karakteristika hidraulične turbine u eksploataciji pomoću veštačkih neuronskih mreža*, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Beograd, 2020.
- [8] Wu, Y., Li, S., Liu, S., Dou, H.S., Quan, Z. *Vibration of Hydraulic Machinery*, Mechanisms and Machine Science, Vol. 11, 2013. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6422-4>
- [9] Hartog, D. *Vibracije u mašinstvu*, Gradjevinska knjiga, Beograd, 1972.
- [10] Jovanović, R., Božić, I. Primena veštačkih neuronskih mreža u određivanju energetske karakteristike propelerne hidraulične turbine, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. XVII, No. 1-2, pp. 297-304, 2015.
- [11] Jovanović, R. Izvodi sa predavanja na predmetu *Inteligentni sistemi upravljanja*, Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet, Beograd, 2019.
- [12] Vlasinske hidroelektrane, Tehničke karakteristike hidroelektrane „Врла 3“, <https://www.energetskiportal.rs/predstavljamo-hidroelektrane-u-srbiji/> [pristupljeno 12.01.2021]
- [13] Why ISO 7919 Is Important For Vibration Measurement Engineers, <http://www.vibsens.com/index.php/knowledge-base/iso10816-iso7919-charts/iso7919-charts> [pristupljeno 12.01.2021]

AUTORI

Jovana Petrović, mast. inž. maš., student doktorskih studija, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, petrovicjovanamas@gmail.com
dr Ivan Božić, dipl. inž. maš., vanredni profesor, Rukovodilac Laboratorije za istraživanje, razvoj, ispitivanje i optimizaciju hidroelektrana, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, ibozic@mas.bg.ac.rs