

**PRIMJENA VJEŠTAČKE INTELIGENCIJE U ODRŽAVANJU
PROCESNIH VENTILATORA**

**APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MAINTENANCE
OF PROCESS FANS**

**M.Sc. Alić Senad, B.Sc. Mech. Eng.
„Arcelor Mittal“ Zenica, Zenica**

**Dr. Sc. Safet Brdarević,
Univerzitet u Zenici, Mašinski fakultet u
Zenici**

**Dr. Sc. Jakub Osmić,
Univerzitet u Tuzli, Fakultet
elektrotehnike Tuzla**

REZIME

U ovom radu je predstavljen aplikativni softver baziran na vještačkoj inteligenciji za predviđanje vrijednosti vibracija i temperature kliznih ležajeva elektromotora i radnog kola procesnih ventilatora velikih snaga i velikih brzina okretanja. Aplikativni softver je realiziran korištenjem softverskog paketa Matlab kao i Fuzzy Logic Toolbox-a. Podešavanje pravila i optimizacija parametara fuzzy logičkog sistema je izvršena korištenjem Adaptivnog neuro-fuzzy sistema zaključivanja (Adaptive Neuro – Fuzzy Inference Systems – ANFIS). Podaci za treniranje, verifikaciju i testiranje fuzzy logičkog sistema dobiveni su iz baze podataka kontinuirano praćenih vibracija i temperatura za četiri klizna ležaja. Osnovne mogućnosti aplikativnog softvera su proračun i prikaz dijagrama predevičanja vrijednosti vibracija i temperatura u željenom vremenskom prozoru.

Ključne riječi: vještačka inteligencija, fuzzy logički sistemi, prediktivno održavanje, vibracija, temperatura

ABSTRACT

This paper presents application software which is based on artificial intelligence which serves for anticipation of vibration values and slide bearings temperature of el. motor and impeller of high power and rotation speed process fans. Application software is made using software package Matlab and Fuzzy Logic Toolbox. Setting of rules and adjusting of parameters of fuzzy logic system is made by using of Adaptive Neuro – Fuzzy Inference Systems – ANFIS. Training, verification and testing data of fuzzy logic system are obtained based on continuously monitored actual vibration and slide bearing temperature data base. Basic possibilities of applicative software are calculation and illustration of predictive vibration and temperature values within desired time period.

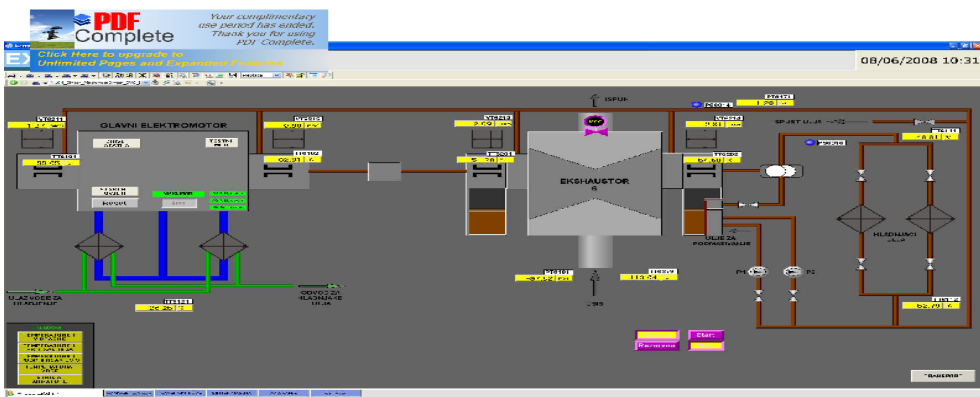
Key words: artificial intelligence, fuzzy logic systems, predictive maintenance, vibration, temperature

1. UVOD

Procesni ventilatori snage $P = 2,5$ [MW], $n=1500$ [o / min] su važni tehnički sistemi i spadaju među najvažnije dijelove postrojenja aglomazina koje su glavna metalurška postrojenja za proizvodnju aglomerata (sintera), koji služi kao glavni uložak za visoku peć. Oni služe za prisisavanje, omogućavanje sagorjevanja (sinterovanja) aglomerata na aglomazinama i za otprašivanje postrojenja putem usisavanja dimnih plinova i prečišćavanja u elektrofilterima i ovdje su obilježeni sa 4,5 i 6. Današnjim razvojem informatike, računarske i mjerne tehnike postavlja se problem kako iskoristiti ta dostignuća u pogledu održavanja i saznavanja pravovremenog stanja procesnih ventilatora. Korištenjem kontinuiranog monitoringa koji daje bazu podataka, informatike i vještačke inteligencije treba doći do saznanja o stanju procesnih ventilatora kao složenih tehničkih sistema. U ovom radu je dat jedan pristup izračunavanju zdravlja procesnih ventilatora kao složenih tehničkih sistema, preko korištenja (*Adaptive Neuro – Fuzzy Inference Systems – ANFIS*). Procesni ventilator tipa 6500 – II – 4 na kome je vršeno ispitivanje za ovaj rad je centrifugalni ventilator koji je konstruisan i izrađen u Novskoj tvornici strojeva V.I. Lenjin, SSSR. Postrojenje procesnih ventilatora 4,5,6 imaju 4 kućišta ležajeva sa kliznim ležajevima (elektromotor je oslonjen na dva klizna ležaja i rotor procesnog ventilatora na dva klizna ležaja). Na svim ležajevima se kontinuirano mjere:

- temperatura kliznih ležajeva TT4101, 4102, 4201, 4202 , 5101, 5102, 5201, 5202, 6101, 6102, 6201, 6202, temperatura dimnih plinova na ulazu u procesni ventilator 4,5,6 TT4131, 5131, 6131, temperatura vode za hlađenje motora u sistemu hlađenja sa zrakom procesnog ventilatora 4,5,6 TT4121, 5121, 6121, temperatura ulja za podmazivanje kliznih ležajeva na ulazu u hladnjak koje se hladi vodom procesnog ventilatora 4,5,6 TT4112, 5112, 6112, temperatura ulja iza hladnjaka ulja koje se hladi vodom za procesni ventilator 4,5,6, TT4111, 5111, 6111,
- vibracije ležajeva VT 4211, 4212, 4213,4214, 5211, 5212, 5213, 5214, 6211, 6212, 6213, 6214, za klizne ležajeve procesnih ventilatora 4,5,6.

Senzori za kontinuirano mjerenje temperature i vibracija su postavljeni na klizne ležajeve procesnih ventilatora. Snimljeni su mjerni podaci temperature i vibracija za period 1.5.2010 – 1.3.2012 za tri procesna ventilatora. Interval uzimanja mjernih vrijednosti temperatura i vibracija je 60 minuta. Snimljene su tri matrice 16083x8 (16083 mjernih vrijednosti u 8 varijabli). Ove tri matrice su ulazi u Matlab program za automatsku identifikaciju.



Slika 1. Šematki prikaz postrojenja procesnih ventilatora br. 4 , 5 i 6 sa mjestima za mjerenje radnih parametra

Ovdje na slici 1. je dat tlocrt procesnih ventilatora br. 4, 5 i 6 aglomasha br. 4,5 i 6 i rasporeda instaliranih senzora preko kojih se kontinuirano prate predviđeni parametri.

2. PREDVIĐANJE VIBRACIJE I TEMPERATURE LEŽAJEVA EKSHAUSTORA

Sistem za predikciju vibracija i temperature ležaja ekshaustora je projektovan korištenjem ANFIS-a (engl- Adaptive Neuro Fuzzy Inference System). ANFIS predstavlja sistem za meko izračunavanje (engl. soft computing) u kome se koriste dobre osobine i fuzzy i neuro sistema. Interfejs prema korisniku je Sugeno fuzzy sistem dok se učenje fuzzy sistema vrši tako da se fuzzy sistem predstavi neuronskom mrežom, a onda se korištenjem metoda back propagacije ili back propagacije u kombinaciji sa metodom najmanjih kvadrata vrši podešavanje (treniranje) parametara neuronske mreže (treniranje neuronske mreže) koja je ekvivalent polaznom fuzzy sistemu. Rezultat treniranja neuronske mreže je Sugeno fuzzy system. Polazni fuzzy sistem za treniranje može biti u potpunosti predložen od strane dizajnera fuzzy sistema ili može biti automatski kreiran korištenjem jednog od dva dostupna metoda: mrežasto (engl. grid) particioniranje ili particioniranje korištenjem tehnike klastera (engl. clusters). Za prvu automatsku metodu kreiranja fuzzy sistema se koristi Matlab funkcija `genfis1.m`, a za drugu `genfis2.m`. Sintaksa funkcije `genfis1` je sljedeća:

$$\text{fismat} = \text{genfis1}(\text{data}, \text{numMFs}, \text{inmfype}, \text{outmfype}) \quad (1)$$

gdje je: - `fismat.fis` generirana fuzzy struktura,
- `data` predstavlja matricu ulaznih i izlaznih podataka za trening fuzzy strukture,
- `numMFs` je od strane korisnika predloženi broj funkcija pripadnosti po svakom ulazu i izlazu (uvijek jednom) fuzzy sistema.

Korištenjem `genfis1` funkcije se generira Sugeno fuzzy sistem sa brojem pravila jednakim produktu brojeva ulaznih funkcija pripadnosti dodijeljnih svakom ulazu. Npr. ako se imaju tri ulazne varijable u fuzzy sistem sa po tri funkcije pripadnosti tada je ukupan broj pravila $3 \times 3 \times 3 = 27$. Ova činjenica može predstavljati veliki problem ukoliko postoji veliki broj ulaza u fuzzy sistem pri čemu se želi postići visoka rezolucija particioniranja ulaznog prostora fuzzy sistema. Zbog toga se inicijalizaciju Sugeno fuzzy sistema prediktora koristi funkcija `genfis2` koja ima sljedeću sintaksu:

$$\text{fimsat} = \text{genfis2}(\text{Xin}, \text{Xout}, \text{radii}) \quad (2)$$

gdje je: - `Xin` matica vrijednosti ulaznih varijabli u fuzzy sistem,
- `Xout` matrica izlaznih vrijednosti fuzzy sistema.

Parametar `radii` je vektor koji specificira područje uticaja centra klastera dodijeljenog ulaznoj ili izlaznoj varijabli. Parametar `radii` je realan broj između 0 i 1 i u principu cijeli dio od $1/\text{radii}$ predstavlja broj funkcija pripadnosti dodjeljenih ulaznim odnosno izlaznim varijablama. Korištenjem ove funkcije broj pravila generiranog fuzzy sistema se značajno smanjuje, na koji način se i broj parametara fuzzy sistema značajno smanjuje, pa je treniranje fuzzy strukture pojednostavljeno. U predloženom prediktoru vibracija i temperature fuzzy sistem je generiran korištenjem funkcije `genfis2`. Samo učenje fuzzy strukture se vrši korištenjem funkcije `anfis` čiji je parametar broj epoha treninga.

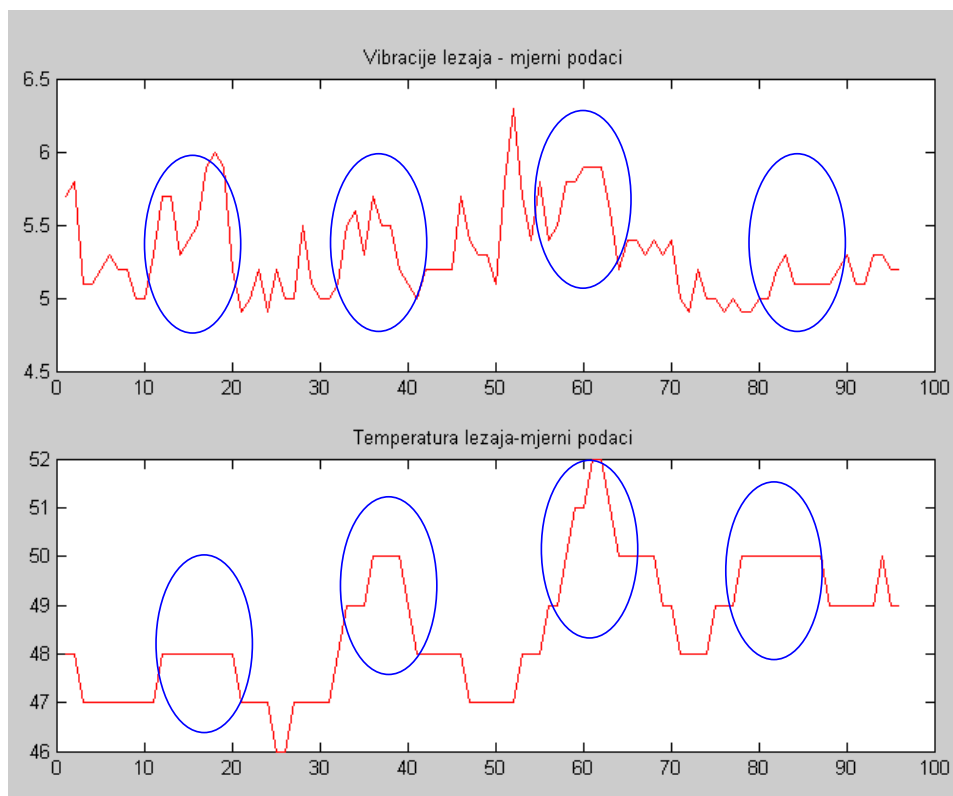
Na slici 2 su prikazane vibracije i temperature ležaja u pogodno odabranom vremenskom okviru od 4 dana to jeste 96 sati (juni 2010. godine). Na slici se može vrlo jasno uočiti periodičnost (sa periodom od 24 sata) promjene temperature i također se može uočiti i periodičnost promjene vibracija sa periodom od 24 sata. Isto tako se može uočiti da u periodima porasta vibracija raste i temperatura ležaja. Jasno je da sa povećanjem intenziteta vibracija dolazi do povećanja temperature.

Na slici 3 je prikazan intenzitet vibracija i temperature ležaja 1 u periodu od 2 godine počevši od maja 2010. godine do kraja marta 2011. godine. Vidljivo je da postoji ovisnost temperature

ležaja o godišnjem dobu. Obvojnica promjene temperature ležaja ima period od jedne godine. Ovisnost vibracija ležaja o godišnjem dobu ne može se uočiti, odnosno ne može se jasno uočiti korelacija vibracija i temperature iz smjera temperature prema vibracijama. Uzimajući sve u obzir može se zaključiti da vibracije ležaja ovise o dobu dana (odnosno o nekoj za sada nepoznatoj varijabli koja zavisi o dobu dana). Također vibracije ne ovise vidljivo o temperaturi ali je potencijalno moguće da postoji slaba korelacija vibracija o godišnjem dobu. Isto tako temperatura ležaja ovisi o vibracijama ležaja i eventualno o dobu dana, kao i godišnjem dobu. Uzimajući sve u obzir moguće je predložiti sljedeći model predikcije vibracija:

$$V(t+d) = f_v[V(t), V(t-d), \dots, V(t-n*d), S(t), M(t), param_v] \quad (3)$$

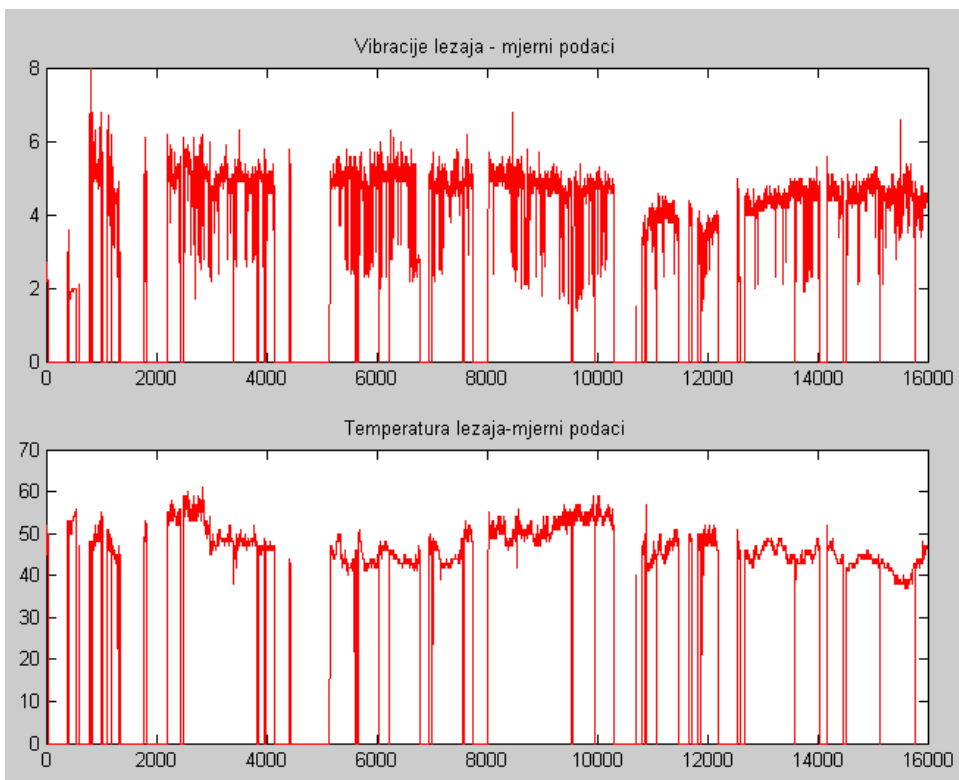
- gdje je:
- f_v je funkcija realizirana fuzzy strukturom dobijenom korištenjem ANFIS-a,
 - $param_v$ je skup parametara fuzzy strukture koji se dobija podešavanjem fuzzy strukture korištenjem ANFIS-a,
 - $S(t)$ jeste dnevno vrijeme u satima,
 - $M(t)$ jesu redni brojevi mjeseci u godini.



Slika 2. Vibracije i temperatura ležaja 1 u periodu od 48 sati (početak je u 07 sati ujutro)

U konkretnom primjeru je odabrano je $n = 2$ pa se prema tome za izračunavanje vrijednosti predviđanja vibracije koriste se trenutna vrijednost vibracija, i vibracije u prethodna dva koraka. Parametar d predstavlja period uzorkovanja signala (u satima). U konkretnom primjeru je uzeto $d = 1$ ili $d = 2$. Na slici 4 je prikazan fuzzy sistem za predviđanje vibracija i

temperature. Ukoliko su prekidači P i P_1 u gornjem položaju predikcija se vrši za vrijeme d sati. Ukoliko su prekidači P i P_1 u donjem položaju tada se predikcija može vršiti u dužem vremenskom periodu jednakom $k*d$ gdje je k proizvoljno odabran prirodan broj tako da se dobije širok prozor predviđanja uz zadovoljavajuću tačnost predikcije.



Slika 3. Vibracije i temperatura ležaja 1 u vremenskom periodu od 2 godine počevši od maja 2010. godine.

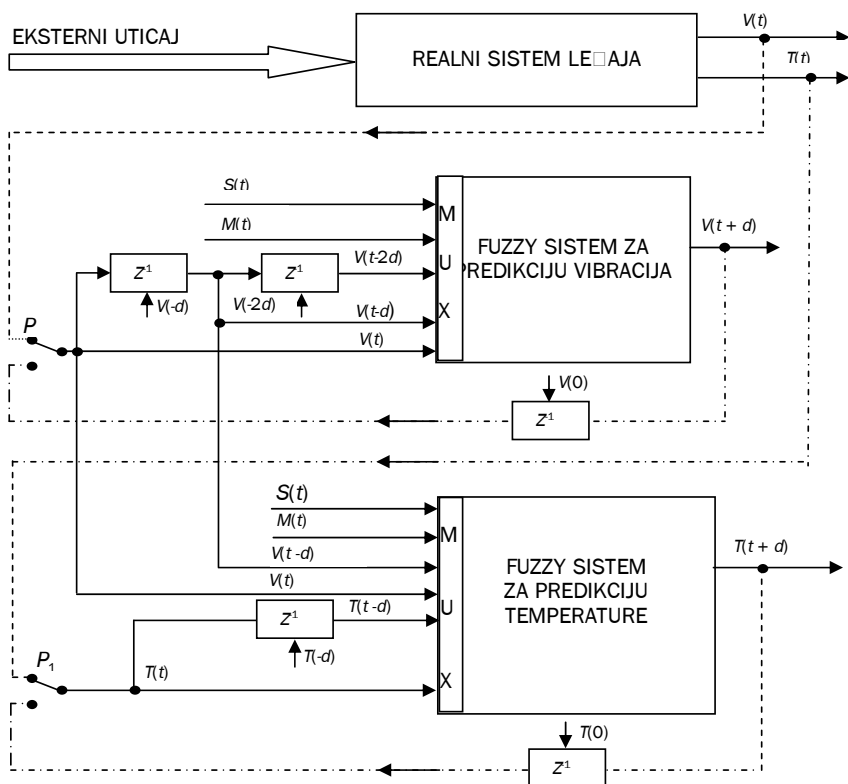
Model predviđanja temperature je opisan sljedećom formulom:

$$T(t+d)=f_T[V(t),V(t-d),\dots,V(t-n_1*d),T(t),T(t-d),\dots,T(t-n_2*d),S(t),M(t),param_T] \quad (4)$$

gdje je: - f_T je funkcija realizirana fuzzy strukturom dobijenom korištenjem ANFIS-a,
 - $param_T$ je skup parametara fuzzy strukture koji se dobija podešavanjem fuzzy strukture korištenjem ANFIS-a,
 - $S(t)$ jeste dnevno vrijeme u satima,
 - $M(t)$ jesu redni brojevi mjeseci u godini.

U konkretnom primjeru je odabrano je $n_1 = n_2 = 1$ pa se prema tome za izračunavanje vrijednosti predviđanja temperature ležaja koriste trenutna vrijednost vibracija, vrijednost vibracija u prethodnom koraku, trenutna vrijednost temperature kao i vrijednost temperature u prethodnom koraku. U praktičnoj realizaciji estimatora strukture prikazane na slici 4 su realizirane za takozvani nominalni režim i režim otkaza (kvara). Modeli predviđanja u nominalnom režimu i otkazu su strukturno identični ali se razlikuju u parametrima, što se postiže trenirajući strukture koristeći dva različita seta trening podataka tj. podataka za nominalni režim i režim okaza. U radnom režimu obje strukture rade paralelno ali se odluka

koja je predviđanje tačnija uzima upoređujući predviđanje oba modela u prethodna tri koraka sa stvarnim mjerenjima vibracija u prethodna tri koraka. Model koji ima manju prosječnu apsolutnu vrijednost greške predikcije u prethodna tri koraka uzima se kao pouzdaniji model za predikciju u tekućem koraku. Treba napomenuti da se red sistema za predviđanje vibracija i temperature može relativno jednostavno promijeniti promjenom parametara n , n_1 i n_2 , kao i promjenom broja ulaza u multiplekser, vodeći računa o redosljedu ulaza prema logici na slici 4. Također je nakon učinjenih izmjena potrebno ponovo pokrenuti postupak treniranja fuzzy struktura za predviđanje temperature, kako za nominalni režim tako i za režim otkaza (kvara).



Slika 4. Fuzzy sistem za predikciju vibracija i temperature

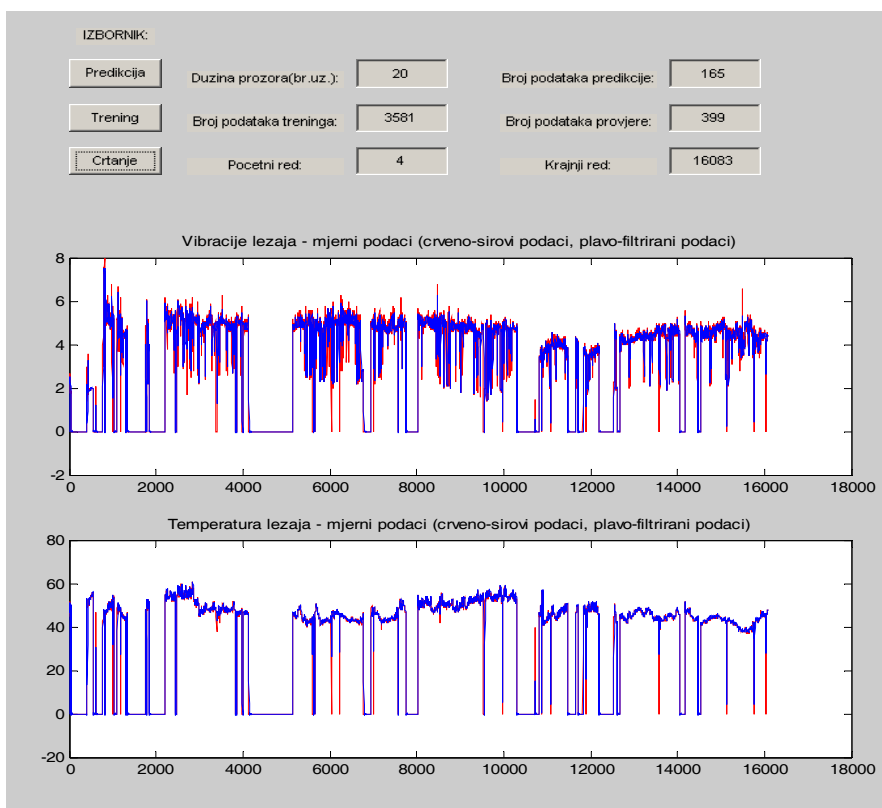
Isto tako se mora napomenuti da je prilikom korištenja podataka o temperaturi i vibracijama ležaja bilo za crtanje, predikciju ili treniranje moguće koristiti filtrirane podatke. Ako je odabrano filtriranje podataka, tada se podaci o temperaturi i vibracijama filtriraju korištenjem filtera drugog reda sa funkcijom prenosa

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5)$$

pri čemu je: - ζ ($= 0.8$) faktor relativnog prigušenja polova, a ω_n ($= 1$ rad/s) prirodna neprigušena učestanost polova.

Na slici 4 je prikazan osnovni prozor grafičkog interfejsa aplikativnog programa za predviđanje vibracija i temperature ležaja. Aplikativni program omogućava **crtanje** sirovih ili filtriranih podataka vibracija i temperature ležaja iz Excel tabele, **treniranje** fuzzy logičkog sistema i **predviđanje** vibracija i temperature. Odabirom početnog i krajnjeg reda Excel

tabele, u kojoj su smješteni podaci o vibracijama i temperaturi ležaja i pritiskom na taster crtanje, omogućava se crtanje sirovih ili filtriranih podataka vibracija i temperature ležaja. Za treniranje fuzzy logičkog sistema je potrebno odabrati broj podataka koji se koriste za treniranje i broj podataka koji se koristi za provjeru. Podaci za provjeru onemogućavaju pojavu tzv. over-fitting-a. Fenomen over-fittinga se pojavljuje kada trenirani sistem počinje da modelira slučajne komponente u trening podacima. Zbog toga se kao kriterijumska funkcija za ocjenu tačnosti fitovanja stvarnog modela vibracija i temperature ležaja fuzzy logičkim sistemom, koristi greška fitovanja izračunata korištenjem podataka provjere odnosno podataka koji nisu korišteni za treniranje fuzzy logičkog sistema.



Slika 5. Predikcija vibracija i temperatura za 16000 mjerenja vibracija i temperatura iz MS Excel fajla

Kada greška fitovanja, izračunata na osnovu podataka provjere, prestane da opada proces treniranja fuzzy logičkog sistema se zaustavlja.

Izborom broj podataka koji se koriste za predikciju kao i dužine prozora za predikciju aplikativni softver omogućava predikciju vibracija i temperature ležaja.

4. ZAKLJUČCI

Na osnovu predstavljenog metoda predikcije vibracija i temperature ležaja procesnih ventilatora korištenjem fuzzy logičkog sistema i ANFIS-a tj. korištenjem vještačke inteligencije, može se zaključiti sljedeće:

- predloženim pristupom moguć je proračun i prikaz dijagrama predviđanja vrijednosti vibracija i temperatura u željenom vremenskom prozoru, tj. moguće je doći do saznanja o karakteru i zakonitosti ponašanja temperature i vibracija rada kliznih ležajeva, elektromotora i radnog kola ovakvih procesnih ventilatora velikih snaga i velikih brzina vrtnje.
- pomoću kontinuiranog monitoringa je moguće provesti softverski proces mašinskog učenja, izradu dijagnostičkog i prognostičkog modula o ponašanju tehničkih sistema procesnih ventilatora i izvršiti dalje analize stanja i ponašanja značajne za njihov rad i održavanje.
- predloženim metodom je takođe moguće doći do saznanja o međusobnoj vezi temperature i vibracija kliznih ležajeva kao i drugih varijabli stanja ili eksternih varijabli složenog multivarijabilnog sistema procesnih ventilatora koji zajedno sa ostalim sastavnim dijelovima čine složen tehnički sistem.
- ovakvim pristupom je moguće dobijati kontinuirano prognostičke vrijednosti temperatura i vibracija koje se kontinuirano mijenjaju kod ovih procesnih ventilatora i time planirati odgovarajuće zahvate održavanja, planirati troškove i zaposlenike za održavanje, a sve sa ciljem poboljšanja kvaliteta održavanja ovih postrojenja.

5. LITERATURA

- [1] J. S. R. Jang: *ANFIS - Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System*, IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics, vol.23, no.3, (1993), 665-685
- [2] Jang, J.-S. R., Sun, C.-T., Mizutani, E.: *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Prentice Hall, London, 1997, p. 613.
- [3] P. Subaši: *Fazi logika i neoronske mreže*, Tehnička knjiga, Beograd, 1997, str. 201.
- [4] M. Čupić, B. Dalbello Bašić, M. Golub: *Neizrazito, evolucijsko i neuroračunarstvo*, kolovoz 2013.
- [5] A.K.Seth, A: *MATLAB toolbox for Granger causal connectivity analysis*, Journal of Neuroscience Methods 186, 2010.
- [6] *Fuzzy Logic Toolbox™ User's Guide*, The MathWorks, Natick, 2010.
- [7] J. E.Poliščuk: *Ekspertni sistemi, Metode za razvoj ekspertnih sistema, Arhitektura ekspertnih sistema, Izgradnja ekspertnih sistema*, ETF Podgorica
- [8] S. Brdarević, *Održavanje sredstava rada*, Mašinski fakultet Zenica, Zenica, 1996.