

Prototip sistema za avtomatsko kontrolo kakovosti sesalnih enot

Dejan Tinta¹, Uroš Benko¹, Janko Petrovčič¹, Đani Juričić¹, Mina Žele¹, Andrej Rakar¹,
Jože Tavčar², Jožica Rejec²

¹Odsek za sisteme in vodenje

Institut Jožef Stefan, Jamova 39, 1000 Ljubljana, Slovenija

²Domel, Otoki 21, 4228 Železniki

dejan.tinta@ijs.si

A PROTOTYPE SYSTEM FOR AUTOMATIC QUALITY CONTROL OF VACUUM CLEANER MOTORS

Abstract: In this paper a prototype of the diagnostic system for quality end-test of vacuum cleaner motors is presented. The core of the system are four modules for features extraction that rely on analysis of commutation, vibration analysis, sound analysis and a mathematical model. Features resulting thereof are processed by the reasoning module based on Transferable Belief Model.

1 Uvod

Sesalna enota predstavlja sklop univerzalnega elektromotorja in zračnega turbinskega kolesa, ki vleče zrak. Težnja proizvajalcev je zagotoviti 100 % brezhibne enote pri čim nižjih stroških proizvodnje. To pa zahteva dobro organiziran proces zagotavljanja kakovosti. V Domelu, ki je eden največjih evropskih proizvajalcev sesalnih enot, proces zagotavljanja kakovosti v osnovi poteka na treh nivojih. Med samo proizvodnjo se izvajajo nekateri standardni, avtomatski testi na posameznih sklopih (npr. balansiranje rotorja, visokonapetostni preizkus, itd.). Ti testi omogočajo odkrivanje nepravilnosti le na nivoju sestavnih delov. Nekatere napake, ki se zgodijo pri montaži, pa je mogoče odkriti šele na končnem izdelku. Zato je temeljita končna kontrola sesalnih enot zelo pomembna. Končni test trenutno vključuje ročno merjenje vibracij, kontrolo hrupa in vizualni pregled. Drugi nivo procesa zagotavljanja kakovosti predstavlja obsežen pregled naključno izbranih vzorcev izmenske proizvodnje. Na tretjem nivoju se nekaj sesalnih enot iz vsake serije podvrže testu življenske dobe. Tak način zagotavljanja kakovosti pa zahteva veliko ročnega dela in posledično tudi stroškov. Zmanjšanje le-teh pa lahko dosežemo z uvedbo

sistema za temeljito, avtomatsko testiranje končnih izdelkov, ki bi poleg odkrivanja slabih sesalnih enot bil sposoben tudi določiti vrsto oz. izvor napake. Tak sistem bi obenem predstavljal pomembno podporo operaterjem pri odločanju o potrebnih ukrepih na proizvodni liniji.

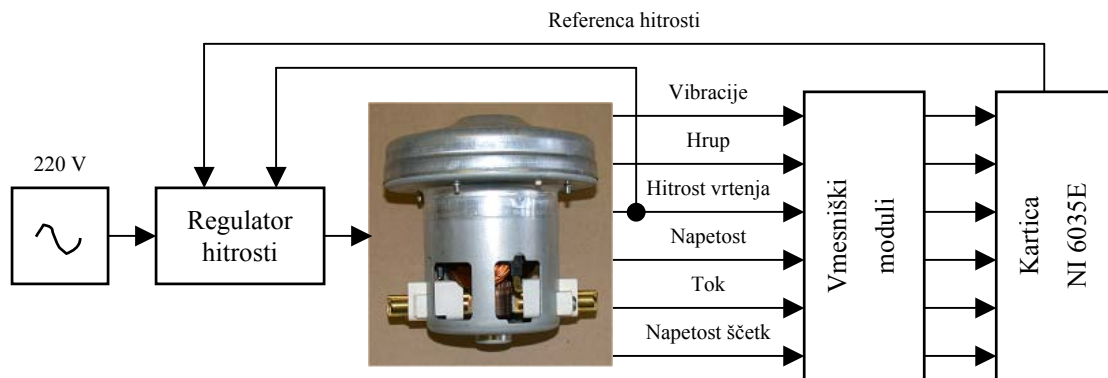
S takšnimi sistemi, vendar z različnimi načini realizacije, so se v preteklosti ukvarjali tudi nekateri avtorji [1, 2]. Zelo učinkovita je izvedba na podlagi analize toka [3], ki pa je primerna le za motorje s permanentnim magnetom. Žal pa ta rešitev v našem primeru ni uporabna, saj serijska vezava rotorskih in statorskih navitij pri univerzalnih motorjih povzroča dušenje hitrih sprememb toka, v katerih se odražajo nekatere napake.

Namen tega prispevka je predstaviti prototip sistema za avtomatsko kontrolo kakovosti sesalnih enot. Osnova sistema je platforma, ki omogoča kontroliran zagon motorja in merjenje šestih fizikalnih veličin. Jedro diagnostičnega sistema predstavljajo štirje moduli za generacijo značilik, ki temeljijo na analizi komutacije, analizi vibracij, analizi hrupa in semi-fizikalnem modelu sesalne enote. Generirane značilke predstavljajo vhod v odločitveni modul, ki s pomočjo mehkega sklepanja ugotavlja lokacijo morebitne napake.

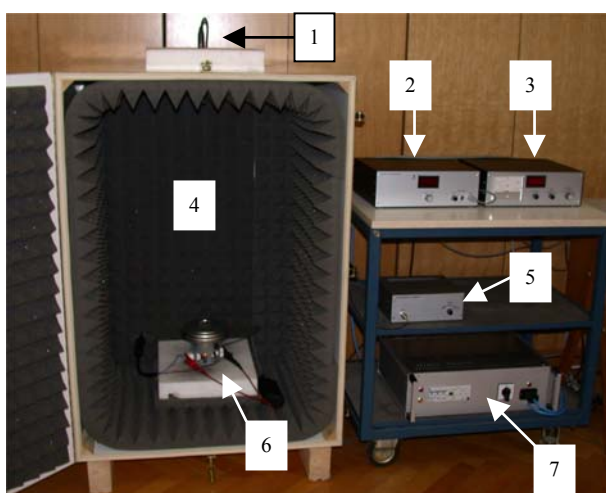
Članek je organiziran na sledeč način. V drugem poglavju je predstavljena struktura diagnostičnega sistema. Opis posameznih modulov za generacijo značilik sledi v naslednjih štirih poglavjih. Sedmo poglavje podaja razlago delovanja odločitvenega modula. V osmem pa je predstavljeno delovanje sistema.

2 Struktura diagnostičnega sistema

Odkrivanje napak na sesalnih enotah temelji na kratkotrajnem zagonu enote in analizi šestih izmerjenih veličin: napajalne napetosti, toka, napetosti



Slika 1: Blokovna shema HW dela eksperimentalnega okolja



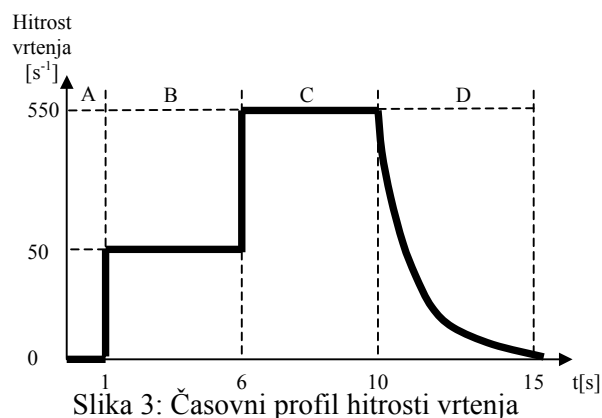
Slika 2: Eksperimentalno okolje: 1 – mikrofoni, 2 – regulator hitrosti, 3 – merilnik iskrenja, 4 – gluha komora, 5 – vmesnik signala vibracij, 6 – sesalna enota, 7- napajalni del

na ščetkah, vibracij, hrupa in vrtljajev. Vse to omogoča eksperimentalno okolje, ki je prikazano na sliki 2, delna blokovna shema pa na sliki 1.

Vibracije se zaznavajo s pomočjo piezoelektričnega senzorja. Hrup se meri s kapacitivnim mikrofonom v gluhi komori zato, da se prepreči odbijanje zvoka in zaduši motilni hrup iz okolice. Hitrost vrtenja se ugotavlja s pomočjo infrardečega senzorja. Izhod tega merilnika pa predstavlja tudi povratno zvezo za regulator hitrosti. Tok se meri posredno preko padca napetosti na precizijskih uporih. Vmesniški moduli skrbijo za prilagoditev signalov, ki nosijo informacijo o merjenih veličinah, na ustrezni napetostni nivo. Omenjeni signali se vzorčijo s pomočjo kartice NI 6035E, ki zmore zajemati podatke s hitrostjo 200 kS/s. Izhod te kartice pa je uporabljen za generiranje reference regulatorja hitrosti. Krmiljenje poskusnega

teka se opravlja iz LabView-a, dočim se generacija značilnik iz izmerjenih signalov opravi v Matlab-u.

Med kratkotrajnim zagonom je sesalna enota regulirana po hitrostnem profilu, ki je prikazan na sliki 3. Fizikalne veličine, ki se zajemajo na posameznih segmentih, pa so podane v tabeli 1. V isti tabeli so naštetje tudi napake sesalne enote, ki se na različne načine odražajo v teh veličinah.

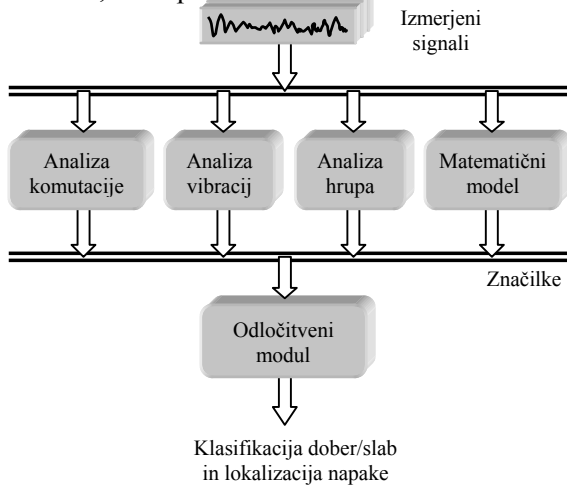


Slika 3: Časovni profil hitrosti vrtenja

Tabela 1: Merjene veličine in napake, ki se odražajo v njih

Segment	Veličina	Napake
A	Napetost Tok	Kratek stik, slabi električni spoji
B	Zvok	Drgnjenje
		Slabi ležaji Stik komutator-ščetka
C	Zvok	Tuljenje
	Vibracije	Debalans rotorja
		Debalans turbinskega kolesa
Napetost ščetk	Povečano iskrenje	
D	Hitrost vrtenja	Drgnjenje

Izmerjeni signali se obdelajo v ustreznih modulih, ki so prikazani na sliki 4.

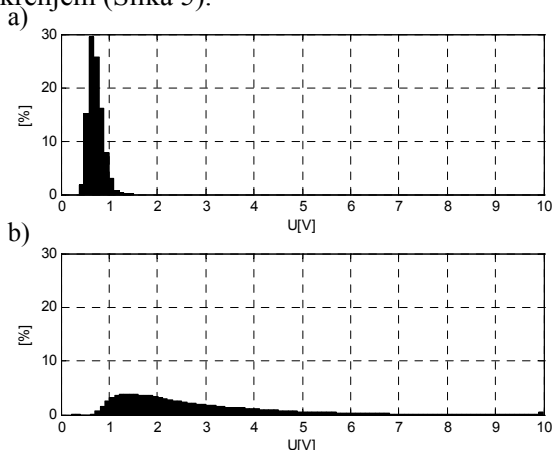


Slika 4: Struktura diagnostičnega sistema

3 Analiza komutacije

Kvaliteta komutacije bistveno vpliva na življensko dobo elektromotorjev. Spreminjanje toka v komutirajoči tuljavi rotorja inducira velike napetostne špice, ki povzročajo iskenje med kolektorjem in ščetkami. Povečano iskenje pa pomeni hitrejšo obrabo ščetk.

Analiza komutacije temelji na zajemanju induciranih visokofrekvenčnih napetostnih motenj, ki so posledica iskenja. Moč teh motenj ustreza intenziteti iskenja [4]. Če vzorce moči motenj uredimo v histogram, vidimo, da lahko jasno ločimo med dobrimi motorji in motorji s povečanim iskenjem (Slika 5).



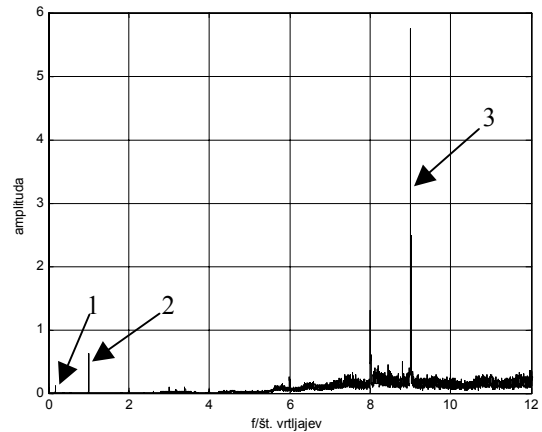
Slika 5: Histograma signala intenzitete iskenja za: a) dober motor, b) motor s povečanim iskenjem

Značilka za vrednotenje iskenja se računa kot obtežena kumulativna vsota histograma signala

intenzitete iskenja. Na ta način se dodatno poudari prisotnost večjih (in zato tem bolj škodljivih) isker.

4 Analiza vibracij

K vibracijam sesalne enote največ prispevajo trije viri, ki se odražajo v različnih frekvenčnih komponentah močnostnega spektra izmerjenega signala vibracij (Slika 6).



Slika 6: Frekvenčni spekter signala vibracij: 1 – nihajoč navor elektromotorja, 2 – neuravnoteženost vrtečih se delov, 3 – sunki zraka turbinskega kolesa

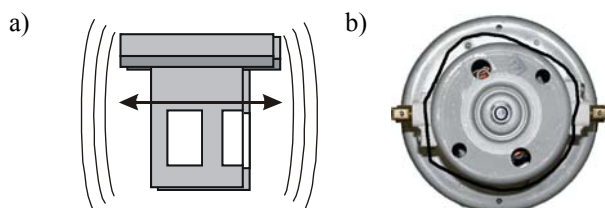
Komponenta pri frekvenci 100 Hz je predvsem posledica spremenljivega navora elektromotorja, ki zaradi izmenične napajalne napetosti niha s frekvenco 100 Hz. Nekaj pa k tej komponenti prispeva tudi magnetostrikcija, ki povzroča širjenje in krčenje materiala v izmeničnem vzbujalnem magnetnem polju motorja. To komponento oz. vzroka zanjo bi lahko izločili s priključitvijo sesalne enote na enosmerno napajalno napetost.

Najbolj izrazita frekvenčna komponenta se pojavi pri devetkratniku frekvence vrtenja sesalne enote. Ta je posledica sunkov zraka, ki jih povzročata turbinsko kolo s svojimi devetimi lopaticami. Zaradi velike hitrosti vrtenja sesalne enote (550 Hz) so ti sunki zraka tako močni, da omenjena komponenta prevladuje v signalu vibracij. Poleg tega pa se njena moč zaradi narave sunkov zraka zelo spreminja.

S stališča klasifikacije sesalnih enot je v spektru vibracij najpomembnejša komponenta pri frekvenci vrtenja enote. V njej se namreč odražajo vse neuravnoteženosti vrtečih se delov sesalne enote. Zato predstavlja osnovo za izločanje enot na podlagi vibracij.

Pri merjenju vibracij je za zajem kvalitetnega in informativnega signala zelo pomembna tudi pozicija senzorja. S poskusi je bilo namreč ugotovljeno, da k

signalu vibracij ne prispeva samo tresenje celotne sesalne enote (Slika 7a), ampak tudi valovanje njenega ohišja (Slika 7b). To valovanje ima svoje vozle in vrhove, katerih položaj razlikuje pri različnih enotah, poleg tega pa je odvisen tudi od hitrosti vrtenja. Pri vseh enotah pa se neglede na hitrost vrtenja pojavijo štirje vozli v točkah, kjer je ohišje pritrjeno na paket statorja. Najboljši položaj senzorja vibracij je prav v teh točkah, saj je tu valovanje ohišja, ki povzroča neponovljivost meritev, najbolj zadušeno.



Slika 7: Vibracije sesalne enote: a) tresenje celotne sesalne enote, b) valovanje ohišja

5 Analiza hrupa

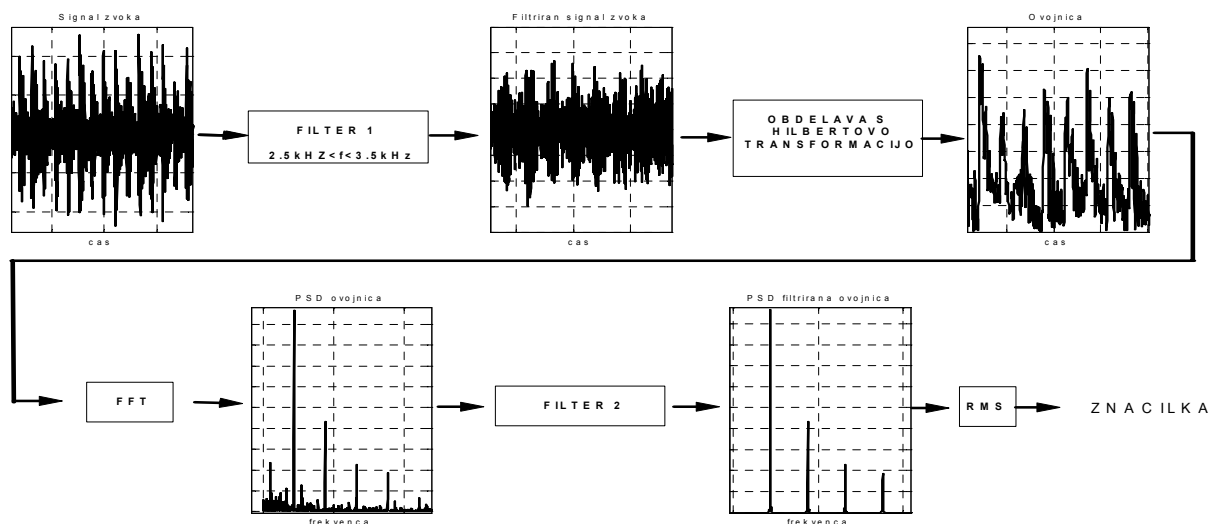
Analiza hrupa je eden izmed pomembnejših pristopov za zagotavljanje kvalitete sesalnih enot. Pri dani enoti se je celo izkazalo, da določenih napak motorja ni mogoče ugotoviti drugače kot iz hrupa [5]. Zvok omogoča detekcijo naslednjih napak:

- okvara ležaja,
- tuljenje sesalne enote,
- nepravilnosti v stiku ščetka-kolektor in

- drgnjenje med vrtečimi se deli, ki povzročajo neprijeten hrup.

Pri montaži se kljub povsem avtomatizirani proizvodni liniji občasno zgodi, da pri natiskanju osi v ohišje motorja pride do poškodbe ležaja. Dotični motor ima kroglične ležaje, zato njihova poškodba predstavlja povečano drgnjenje znotraj ležaja, prekomerno segrevanje ležaja in s tem večjo obrabo, kar pa znatno skrajša življenjsko dobo motorja. Drgnjenje elementov ležaja se neposredno in takoj pozna na zvoku motorja. V zvoku motorja se poškodba ležaja vidi kot ponavljajoči se poki, ki so posledica drgnjenja in trkov med posameznimi deli znotraj ležaja. Frekvenca trkov je odvisna od dimenzij ležaja in hitrosti vrtenja motorja [6]. Ustrezna obdelava signala zvoka omogoča uspešno detekcijo motorjev s poškodovanim ležajem. Slika 8 prikazuje bločno shemo obdelave signala za generiranje značilke, ki podaja stanje ležaja [7].

Glavni vir hrupa pri sesalni enoti je njeno turbinsko kolo. Njegova naloga je ustvariti podtlak in s tem sesalni učinek motorja. Je izvor aerodinamičnega hrupa, ki zavisi predvsem od dimenzij in geometrijskih lastnosti. V primeru, da pride pri izdelavi kolesa do minimalnih odstopanj v geometriji, se to znatno pozna na zvoku. Za uho so neprijetni zlasti zvoki, ki se pojavljajo zaradi sekanja zraka v primeru zvitja pločevine v smeri vrtenja kolesa in zvoki, ki se pojavijo, če oblika lopatice turbokolesa odstopa od željene.



Slika 8: Oris postopka za generiranje značilke

To se odrazi kot tuljenje motorja. Ta napaka je najbolj razvidna v močnostnem spektru hrupa pri osnovni frekvenci vrtenja in njenih mnogokratnikih.

Stik med ščetko in kolektorjem je najpomembnejši drsni stik motorja. Ob predpostavki, da so vsi sestavni deli neoporečni, ta stik določa življenjsko dobo motorja. Ko se ščetka

obrabi, motor odpove. Pri nekaterih motorjih ščetka premočno pritiska ob kolektor, kar poveča obrabo ščetke, s tem skrajša življenjsko dobo, hkrati pa se odraža tudi v zelo neprijetnem zvoku. Tak motor mora biti, če že ne zavoljo krajše življenjske dobe, pa zavoljo neprijetnega zvoka, izločen iz dobave.

Pri rotacijskih strojih se včasih zgodi, da vrteči se deli drgnejo ob mirujoče dele. Tipična taka napaka, ki se pojavi pri motorju je drgnenje turbinskega kolesa ob pokrov. Tako drgnenje je zelo slišno in moteče zlasti pri nizkih hitrostih vrtenja, kjer je moč slišati vsak podrselj posebej.

6 Matematični model

Matematični model sesalne enote je sestavljen iz dveh delov: fizikalnega modela in korekcijskega dela. Fizikalni model podajata spodnji enačbi:

Električni del:

$$u(t) = i(t)(R_v + R_a) + K \cdot i(t) \cdot \omega(t) + (L_v + L_a) \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

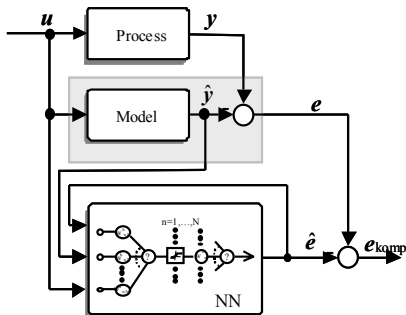
Mehanski del:

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = K \cdot i^2(t) - M_0 - M_1 \omega(t) - M_2 \omega^2(t), \omega > 0 \quad (2)$$

Pomen uporabljenih simbolov je naslednji: $u(t)$ je napajalna napetost, $i(t)$ tok in $\omega(t)$ hitrost vrtenja. Izhodni vektor modela pa je $y = [i \ \omega]'$.

Napako fizikalnega modela zaradi neupoštevanja nelinearnih magnetilnih karakteristik statorja in rotorja odpravimo s pomočjo korekcijskega dela, ki je realiziran z nevronske mreže. Omenjena rešitev je predstavljena na sliki 9.

Semi-fizikalni model služi za preverjanje bilance električne in mehanske moči sesalne enote ter je predvsem primeren za zaznavanje povečanega trenja in napak v električnem delu.



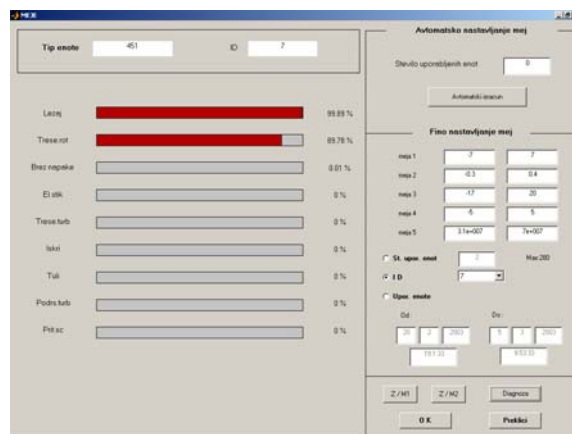
Slika 9: Kompenzacija napake fizikalnega modela

7 Odločitveni modul

Naloga odločitvenega modula je, da na podlagi nabora generiranih značilk poda ustrezno diagnozo o stanju sesalne enote. V ta namen je uporabljen postopek mehkega sklepanja, konkretno model prenosa zaupanja [8], ki generira seznam najverjetnejših napak. Posebnost postopka je njegova sposobnost samoocenjevanja stopnje zaupanja v diagnostične rezultate.

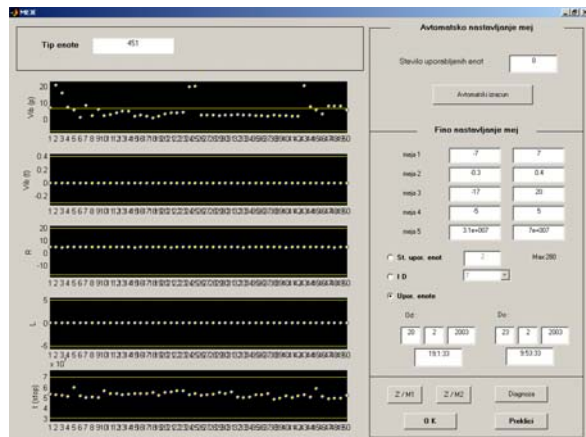
8 Delovanje sistema

Pri uporabi sistema je preizkuševalcu v pomoč grafični vmesnik, preko katerega se proži avtomatsko izvajanje preizkusa sesalne enote. Vmesnik omogoča tudi prikazovanje diagnostičnih rezultatov in shranjevanje le-teh. Primer rezultata diagnoze je prikazan na sliki 10. Iz tega primera je razvidno, da je sistem zmožen prepoznati tudi več napak hkrati. Poleg tega pa nam za vsako napako poda še njeno verjetnost.



Slika 10: Primer rezultata diagnoze

Uporabniški vmesnik omogoča tudi arhiviranje preteklih poskusov in spremljanje trendov kvalitete sesalnih enot (Slika 11). Pri tem ima uporabnik možnost nastavljanja pragovnih vrednosti za ločevanje dobrih od slabih sesalnih enot. Obstaja pa tudi opcija za avtomatsko nastavitve teh mej na podlagi podatkov pridobljenih na učni množici sesalnih enot.



Slika 11: Prikaz rezultatov preteklih poskusov

Sistem oz. njegovi moduli so bili preizkušeni na nekaj sto sesalnih enotah. Sistem odlikujejo naslednje karakteristike:

- sorazmerno visoka ponovljivost diagnoze (nedoločenost generiranih značilnik se giblje med 1 % in 10 %),
- vrednosti značilnik so primerno občutljive na ustrezne napake, kar omogoča zanesljivo ločevanje med dobrimi in slabimi sesalnimi enotami,
- robustnost oz. neobčutljivost na motnje (kot problematičen se izkaže le vpliv temperature na vibracije, ki pa ga lahko izločimo z utekavanjem enote pred meritvijo).

9 Sklep

V delu je predstavljen prototip sistema za avtomatsko končno kontrolo kvalitete sesalnih enot. Test sestoji iz kratkotrajnega zagona sesalne enote, zajema signalov, njihove obdelave z različnimi algoritmi za sintezo značilnik in sklepanja, ki poda končno diagnozo.

Odlika takšnega sistema je neprimerno večja zanesljivost in natančnost v primerjavi z ročno kontrolo kvalitete. Kvantifikacija kriterijev kvalitete pa omogoča njihovo objektivno vrednotenje (predvsem iskrenja in hrupa). Sistem nam daje tudi

globlji vpogled v stanje sesalne enote. Spremljanje trendov kvalitete pa omogoča hitre reakcije na proizvodni liniji.

Popolna avtomatizacija končne kontrole, zmanjšanje števila ponovnih pregledov proizvedenih enot, zagotavljanje visokih standardov kvalitete bo posledično omogočilo zmanjšanje stroškov procesa zagotavljanja kakovosti ter dvig zaupanja kupcev.

10 Literatura

- [1] Edwards, S., A.W. Lees and M.I. Friswell (1998). Fault diagnosis of rotating machinery. *Shock and Vibration Digest*, **30**, 1, 4-13.
- [2] Schenck, Testing and Diagnostic Systems for Vacuum Cleaner Blower, <http://www.Schenck.net>.
- [3] Yang, D. M. and J. Penman (2000). Intelligent detection of induction motor bearing faults using current and vibration monitoring. *Proceedings of COMADEM 2000*, Houston, 461-470.
- [4] Petrovčič, J., Đ. Juričić and D. Tinta (2002). Detektorski sklop in naprava za merjenje intenzitete iskrenja kolektorskih motorjev. Patentna prijava, Rubrum št. P-200200297, Ljubljana, Urad RS za intelektualno lastnino, 10.12.2002.
- [5] Benko, U., J. Petrovčič, Đ. Juričić, J. Tavčar, J. Rejec and A. Stefanovska (2002). Fault diagnosis of a vacuum cleaner motor by means of sound analysis. *Journal of Sound and Vibration*, poslano v objavo.
- [6] Barron, R. (1996). *Engineering Condition Monitoring, Practice, Methods and Applications*. Longman, Glasgow.
- [7] Randall, R.B. (2002). State of the art in monitoring rotating machinery. *Proceedings of ISMA 2002*, **4**, 1457-1477.
- [8] Rakar, A. and Đ. Juričić (2002). Diagnostic reasoning under conflicting data: the application of the transferable belief model. *Journal of Process Control*, **12**, 55-67.