

**VIBRODIJAGNOSTIKA KAO ELEMENAT OSIGURANJA
KVALITETA I POUZDANOSTI: SPIDER 8 – MERNI INSTRUMENT
UNIVERZALNE NAMENE, KONCEPCIJA I PRIMENA**

**VIBRODIAGNOSTICS AS AN ELEMENT FOR QUALITY AND
RELIABILITY ASSURANCE: SPIDER8 – UNIVERSAL MEASURING
DEVICE, CONCEPT AND APPLICATION**

Dr. Hotimir Ličen, redovni profesor
Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u
Novom Sadu
Novi Sad, Srbija i Crna Gora

Mr. Ninoslav Zuber, asistent
Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u
Novom Sadu
Novi Sad, Srbija i Crna Gora

Ključne reči: vibracija, balansiranje, merenje, analiza, softver, hardver

REZIME

Rad ima za cilj prikaz razvijenog mernog sistema za analizu mehaničkih vibracija rotirajućih mašina. Osnovu primenjenog mernog lanca čine: sa jedne strane 16-bitno digitalno merno pojačalo Spider8 proizvođača HBM, Darmstadt opšte namene i sa druge strane namenski razvijen softver. Softver sadrži tri modula: moduo za monitoring i "real-time" analizu, moduo za nestacionarnu analizu ("run-up" i "run-down") i moduo za balansiranje krutog rotora u sopstvenim osloncima. Tako koncipiran sistem je široko primenljiv, potpuno nadogradiv i pre svega ekonomičan. Kroz rad će biti prikazane sve mogućnosti i opcije softvera.

Key words: vibration, balancing, measurement, analysis, software, hardware

1. UVOD

Do ocene kvaliteta rada i stanja rotirajuće mašine je moguće doći praćenjem različitih parametara, koji se mogu oceniti kao:

- *osrednji* (optičke ocenjene promene u načinu rada mašine i ostale subjektivne metode),
- *dobri* (procesne veličine, buka, gubici, električne veličine...) i
- *odlični* (vibracije, porast radne temperature, vreme zaletanja, broj obrtaja, vreme usporenja, snaga, obrtni moment...).

Danas se, u velikom procentu, mehanička vibracija (recimo, merena na kućištu ležaja rotora) uzima kao parametar za praćenje i dijagnostiku stanja rotirajuće mašine.

Da bi se rotirajuća mašina održavala po stanju potreban je odgovarajući merni sistem. Osnovu mernog sistema čini merno pojačalo sa mernim pretvaračima i softver za pripremu merenja,

akviziciju i obradu mernih veličina. Kako su najčešći otkazi odnosno uzroci povišenih vibracija kod rotirajućih mašina: postojanje debalansa, krivo vratilo, nesaosnost spregnutih vratila, dotrajali ležajevi, otkazi zupčastih parova i drugo, tako bi i prateći softver za monitoring i dijagnostiku rotirajućih mašina trebao da sadrži rutine za analizu istih.

Veliki broj vodećih proizvođača merne opreme i softvera u svojoj ponudi proizvoda ima i razvijene merne sisteme (merno pojačalo i softver) za monitoring i dijagnostiku stanja rotirajućih mašina. Zajedničko za većinu ovih rešenja jeste postojanje *jedinstvenog* prenosivog (slika 1.) višekanalnog digitalnog mernog pojačala i različitih verzija softvera. Osnovne verzije softvera uglavnom sadrže bazične funkcije za analizu vibracija rotirajućih mašina i to pre svega one za klasični *monitoring* vibracija (on-line praćenje vibracija i poređenje sa referentnim/graničnim vrednostima). Naprednim modulima su obuhvaćene i rutine za naprednu dijagnostiku rotirajućih mašina: moduo za balansiranje rotora, nestacionarnu analizu vibracija, modalnu analizu, merenje i analizu buke, moduo za otkrivanje otkaza rotora (krivo vratilo, nesaosnost, oštećenje ležajeva, zupčastih parova ...) itd.



SLIKA1. PRENOSIVO MERNO POJAČALO ZA ANALIZU VIBRACIJA – PHAZER, NICOLET TECHNOLOGIES

Koncept jedinstvenog mernog pojačala sa različitim verzijama softvera je nastao kao rezultat različitih potreba kupaca za monitoringom/dijagnostikom rotirajućih mašina i veoma je koristan sa obzirom da napredne verzije softvera mogu biti i do nekoliko puta skuplje (!) u odnosu na bazičnu verziju.

Osnovne mane ovakvih sistema su sledeće:

- Iako modularno zamišljeni, ovi sistemi su i dalje veoma skupi: četvorokanalno pojačalo sa slike 1. sa pratećim mernim pretvaračima vibracija i broja obrtaja i kompletnim softverom za monitoring i dijagnostiku je reda veličine 30000 €!
- Merna pojačala ovakvih sistema su *namenska* merna pojačala za analizu vibracija (analiza signala do 20kHz) i primaju samo merne pretvarače vibracija i broja obrtaja. Kao takva su neprimenljiva za ostale tipove merenja/mernih pretvarača (npr. ne mogu primati merne pretvarače na principu mernih traka), što predstavlja ozbiljnu manu sistema.

Uvidevši gore navedeno, autori ovog rada su razvili sopstveni *univerzalni* i *ekonomični* merni sistem za analizu vibracija rotirajućih mašina koji se ujedno, zahvaljujući svojoj univerzalnosti može primeniti i na ostale tipove mašine.

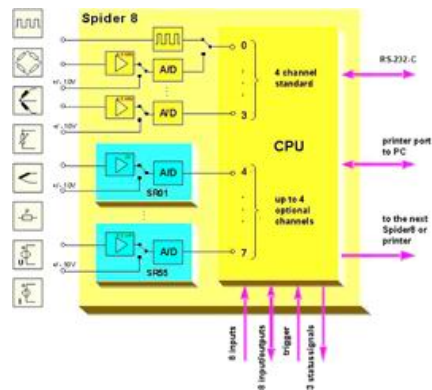
2. MERNI SISTEM ZA ANALIZU VIBRACIJA ROTIRAJUĆIH MAŠINA: SPIDER 8 + NAMENSKI RAZVIJENI SOFTVER

Osnovu razvijenog mernog sistema čine: sa jedne strane digitalno merno pojačalo Spider8 (slika 2.) proizvođača HBM, Darmstadt opšte namene i sa druge strane namenski razvijen softver. Kôd softvera je pisan u Visual Basicu uz primenu ActiveX tehnologije. Spider8 je 16-

bitno merno pojačalo maksimalne brzine smplovanja 10000 merenja/sec, što ga ujedno čini pogodnim i za praćenje brzih procesa (kakve su mehaničke vibracije na rotirajućim mašinama). Sa obzirom na postojanje A/D konvertora na svakom mernom modulu akvizicija po kanalima se odvija bez postojanja faznog odstupanja (veoma bitno kod merenja i analize vibracija).



SLIKA2. OSMOKANALNO DIGITALNO MERNO POJAČALO SPIDER8



SLIKA3. ŠEMA MERNIH MODULA SPIDERA 8

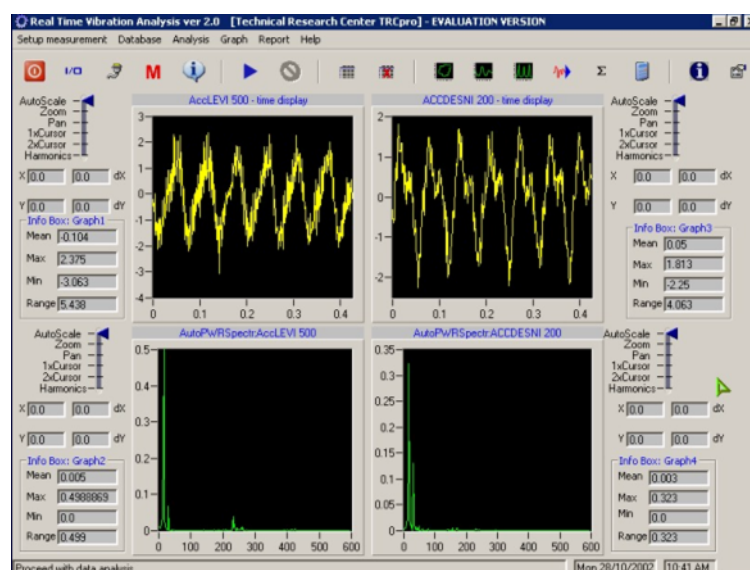
Razvijeni softver u trenutnoj verziji sadrži četiri modula:

- moduo za monitoring i “real-time“ analizu vibracija u stacionarnom režimu,
- moduo za nestacionarnu analizu rotora (“run-up“ i “run-down“ analiza),
- moduo za balansiranje krutog rotora u sopstvenim osloncima u jednoj ili dve ravni i
- moduo za analizu uticaja vibracija na čoveka.

Moduli su verifikovani na eksperimentalnom modelu rotirajuće mašine.

2.1. RTVA: Modul za analizu vibracija u stacionarnom režimu rada

Moduo RTVA (**RealTimeVibrationAnalysis**) je namenjen za tzv. “on-line” praćenje i analizu vibracija rotirajućih mašina u stacionarnom režimu rada (uslovi u kojima se radni broj obrtaja se ne menja).



SLIKA 4. GRAFIČKI INTERFEJS MODULA RTVA ZA ANALIZU STACIONARNIH VIBRACIJA

Ulazna konfiguracija (odnosno tip i broj priključenih mernih pretvarača – aktivnih kanala) može biti proizvoljna s obzirom da softver po inicijalizaciji skenira aktivne kanale mernog pojačala i “prepoznaje” ukupan broj i vrstu mernih pretvarača. Ulazna konfiguracija mernog lanca se može editovati i u toku rada. Brzina merenja i broj merenja su parametri kojima korisnik definiše ukupno vreme merenja. Softver omogućuje nekoliko modova rada u okviru kojih korisnik bira:

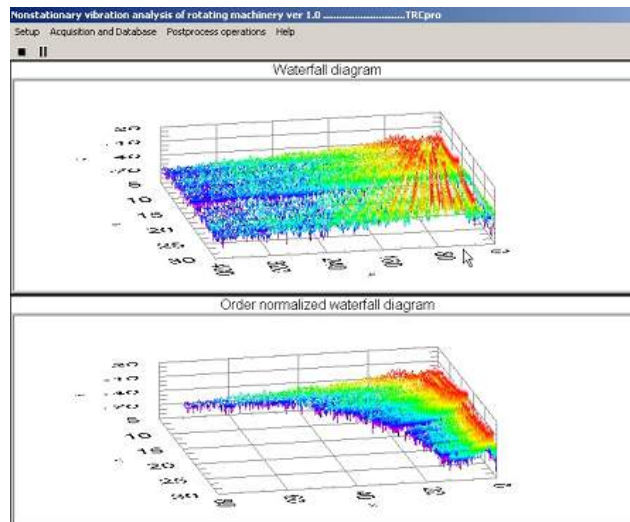
- Snimanje jednog zapisa ili kontinualno merenje (za praćenje stacionarnosti procesa)
- “Online” filtriranje ulaznih signala: za eliminaciju šuma ili tzv. DC komponente
- “Online” integraciju/derivaciju signala: ako korisnik radi sa mernim pretvaračima ubrzanja/pomeranja a želi u “realnom vremenu” da prati brzinu.
- Trigerovana merenja itd.

Nakon izvršene akvizicije, podaci se skladište u internu bazu podataka koja se, u binarnom ili ASCII formatu, memoriše na disku računara). Slikom 4 je data osnovna strana grafičkog interfejsa: na gornjem grafiku se prikazuje vremenski zapis odabranog mernog kanala a na donjem frekventni spektar snage istog kanala. “Pop-up” meni omogućuje odabir kanala koji se posmatra. Sa desne strane grafika nalazi se tzv. “Info-box” sa dodatnim informacijama o odabranom kanalu i prikazanoj funkciji: ime kanala, jedinica, statistički pokazatelji kanala (peak-peak vrednost, minimum, maksimum, srednja vrednost, standardna devijacija itd.)

Za postprocesnu analizu snimljenih podataka implementirane su sledeće funkcije: numerička integracija/derivacija, amplitudno fazni frekventni spektar, unakrsni frekventni spektar, frekventni spektar snage, cepstrum (za analizu zupčastih parova), funkcija korelacije, funkcija distribucije amplitude (relativna i apsolutna), funkcija digitalnog filtriranja itd. Softverom je implementirana i provera vibracija rotirajućih mašina po preporukama VDI2056 a u toku je implementiranje i drugih preporuka iz oblasti monitoringa vibracija rotirajućih mašina.

2.2. NVA: Modul za analizu vibracija u nestacionarnom režimu rada

Moduo NVA (NonstationaryVibrationAnalysis) je namenjen za analizu ponašanja rotirajuće mašine pri njenom zaletanju (“run-up”) ili usporenju (“run-down”). Na taj način moguće je snimanje sopstvenih frekvencija i sopstvenih formi oscilovanja. Prednost ovakvog načina snimanja sopstvenih frekvencija i pridruženih formi oscilovanja nad klasičnom modalnom analizom je to što rotor biva pobuđen sopstvenom pobudom: na taj način je moguće oceniti koja harmonijski red pobuđuje koju sopstvenu formu.



SLIKA 4. ANALIZA HARMONIJSKIH REDOVA I SOPSTVENIH FREKVENCIJA ROTORA SE VRŠI NA OSNOVU DIJAGRAMA VODOPADA

Kod klasične nestacionarne analize, je od interesa brzinu merenja konstantno usklađivati sa trenutnim brojem obrtaja rotora, što međutim zahteva postojanje posebnog uređaja¹ koji znatno diže cenu kompletnog sistema. Problem usklađivanja brzine digitalizacije sa brojem obrtaja je moguće rešiti i primenom triggerovanog merenja i tehnikom digitalnog “resamplovanja” što će biti implementirano u nekim od narednih verzija modula.

Nakon odabira tipa analize (usporenje ili ubrzanje), maksimalnog harmonijskog reda od interesa, rezolucije frekventnog spektra, ukupnog broja zapisa i opsega broja obrtaja rotora program osim brzine digitalizacije i ukupnog broja merenja u jednom zapisu, definiše i inkrement broja obrtaja pri kom se očitavaju zapisi. Nakon završene nestacionarne analize zapisi sa aktivnih kanala pri brojevima obrtaja unutar definisanog opsega se memorišu u bazu podataka i na disk nakon čega su dostupni za postprocesnu analizu. Dinamičko ponašanje rotora u ispitivanom opsegu broja obrtaja se ocenjuje na osnovu tzv “dijagrama vodopada”, slika 4. koji prikazuje odabrani tip frekventnog spektra u funkciji pobude (broja obrtaja).

Modul sadrži sve postprocesne funkcije kao i modul za analizu stacionarnih vibracija.

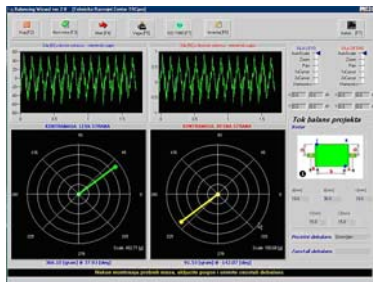
2.3. Balancing Wizard: Modul za balansiranje krutog rotora u sopstvenim osloncima

Namena modula Balancing Wizard je balansiranje krutog rotora u jednoj ili dve ravni u sopstvenim osloncima ili pak u mašini za dinamičko uravnoteženje rotora (balansirka) sa mekim ili krutim osloncima. Moduo je razvijen na principima algoritma za balansiranje krutog rotora primenom uticajnih koeficijenata, te stoga omogućava balansiranje sa permanentnim ili privremenim probnim masama.

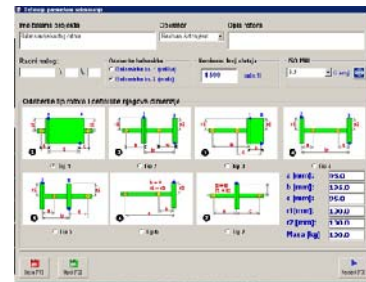
Posebna pažnja pri razvoju modula je posvećena rutini za sračunavanje faznog ugla debalansa u odnosu na referentni položaj na rotoru (markica). Na taj način postignuto je izuzetno stabilno i pouzdano očitavanje faze (bez potrebe za tracking filtrom!) a što je inače i vrlo čest problem kod rada sa mernom opremom za balansiranje.

¹ Digital tracking synthesizer

Pri balansiranju u sopstvenim osloncima, etape rada u softveru su: snimanje amplitude i faze početnog debalansa, postavljanje probne mase u levu korekcionu ravan i snimanje novog stanja, postavljanje probne mase u desnu korekcionu ravan i snimanje novog stanja, sračunavanje uticajnih koeficijenata i korekcionih masa (slika 5), postavljanje probnih masa, kontrolno zaletanje i provera rezidualnog debalansa. Ako je rezidualni debalans veći od tolerantnog za datu klasu rotora vrši se trimovano balansiranje (bez probnih masa) sa obzirom da su uticajni koeficijenti prethodno određeni. Ukoliko se straćunate kontramase ne mogu montirati na datom uglu implemetiran je i algoritram za “razbijanje mase u dve komponente” – što se pokazalo kao veoma korisno kod balansiranja ventilatora.



SLIKA5. POLOŽAJ I VELIČINA KOREKCIONIH MASA U LEVOJ I DESNOJ RAVNI



SLIKA6. PRI BALANSIRANJU U BALANSIRKAMA OBUHVACENE SU SVE MOGUĆE KONFIGURACIJE ROTORA

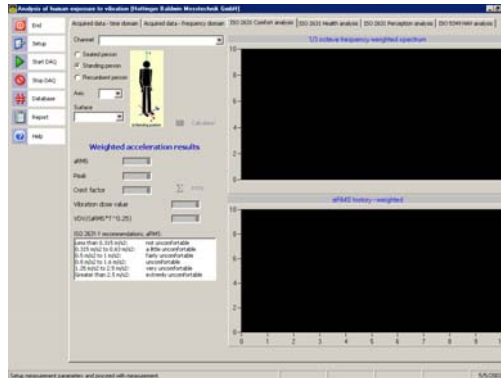
Modulom su implementirane provere rezidualnog debalansa i veličine probne mase po standardu ISO 1940. Također se kvalitet balansiranja i po mirnosći obrtanja rotora i odgovarajućim standardom. Također prilikom balansiranja uz upotrebu probnih masa implementirane su provere nastalog uticaja probnih masa koje mogu u punojmeri uticati na kvalitet izbalansiranosti a što kod većine softverskih sistema ove namene nažalost ne postoji.

Moduo Balancing Wizard se u praksi pokazao kao odlično rešenje pri rekonstrukciji postojećih starih mašina za dinamičko uravnoteženje pri čemu su iste ne samo stavljene u funkciju osavremenjivanjem mernog sistema već je i klasa tačnosti višestruko poboljšana (u odnosu na specifikacije proizvođača mašine!). Primer iz prakse: na mašini za dinamičko uravnoteženje krutih rotora do 3000 kg je proizvođačka tolerancija pre izvedene rekonstrukcije bila 4 gr*mm/kg. Nakon rekonstrukcije je postignuta tolerancija 1 gr*mm/kg!

2.4.HVA: Modul za analizu uticaja vibracija na čoveka

Moduo HVA (HumanVibrationsAnalysis) je namenjen za akviziciju, monitoring i analizu uticaja mehaničkih vibracija na čoveka. Kompletna procedura je napisana po standardima ISO 2631/1997 i ISO 5349/2001.

Kao i prethodni moduli i ovaj je: nezavisan od konfiguracije mernog lanca i tipa mernog pojačala. Analiza vibracija se zasnova na 1/3 oktavnoj analizi vibracija sa uključenim težinskim koeficijentima prema navedenim standardima.



SLIKA7. GRAFIČKI INTERFEJS MODULA ZA ANALIZU UTICAJA VIBRACIJA NA ČOVEKA

Moduo je primenljiv kako na analizu vibracija na celo telo (recimo u vozilima) kao i na šake (rad sa ručnim alatima).

3. ZAKLJUČAK

Razvijeni merni sistem je ekonomičan, nadogradiv i veoma univerzalan sa obzirom da nije korišćeno namensko pojačalo za analizu vibracija već univerzalno merno pojačalo. Na taj način se primena razvijenog softvera za monitoring i dijagnostiku kao i softvera koji će se razvijati u budućnosti ne ograničava samo na primenu na rotirajuće mašine i analizu vibracija već i na monitoring drugih parametara (npr. monitoring dilatacija i napona na odgovornim nosećim konstrukcijama).

4. LITERATURA

- [1] Bendat & Piersol: Measurement and Analysis of Time Series Data,
- [2] Otnes Enochson: Applied Time Series Analysis

