

DARKO MIHAJLOV¹
MOMIR PRAŠČEVIĆ²
DRAGAN CVETKOVIĆ³¹Univerzitet u Nišu
Fakultet zaštite na radu u Nišu¹darko.mihajlov@znrfak.ni.ac.rs²momir.prascevic@znrfak.ni.ac.rs³dragan.cvetkovic@znrfak.ni.ac.rs

DIJAGNOSTIKA STANJA ROTACIONIH MAŠINA POMOĆU VIBRACIJA

Rezime: Monitoring stanja mašina i opreme predstavlja samo jednu od aktivnosti u okviru tehničkog održavanja za čije se potrebe vrši merenje i analiza vibracija. U principu, upotreba vibracija je zastupljena u realizaciji sedam osnovnih grupa aktivnosti u okviru tehničkog održavanja mašinskih sistema. Svaka grupa aktivnosti poseduje određena ograničenja, kako u pogledu mogućnosti ostvarivanja postavljenih ciljeva i zadataka, tako i u mogućnosti prikazivanja osnovnih karakteristika vibracija kako bi se postigli optimalni rezultati.

Ključne reči: vibracije, rotacione mašine, oštećenje, dijagnostika.

UVOD

Monitoring mašina se u današnje vreme razvija u dva osnovna pravca. U okviru jednog od njih, problem smanjivanja broja tačaka za kontrolu vibracija i određivanja vremenskog perioda između merenja rešava se pre svega korišćenjem sistema za kontinualni monitoring. U okviru drugog pravca, vremenski periodi između merenja se maksimalno povećavaju kontrolisanjem vibracija u mnogo tačaka, što podrazumeva merenje vibracija na svakom delu mašine koji može biti izvor vibracija. Povećanje vremenskog perioda omogućava korišćenje pokretne (prenosne) opreme za merenje i analizu vibracija. Efikasnost monitoringa u oba slučaja zavisi od broja raspoloživih (dostupnih) delova za sprovođenje procedure merenja. Taj broj se kod mašina sa rotacionim elementima može povećati sprovođenjem uskopojasne analize, koja se naročito uspešno primenjuje za analizu periodičnih komponenta signala.

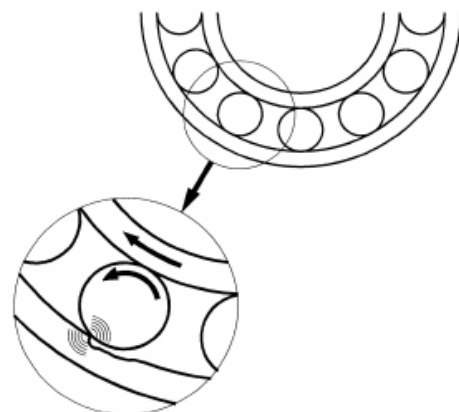
U praktičnoj primeni dijagnostike stanja mašina pomoću vibracija postoje dva osnovna pristupa u rešavanju dijagnostičkih problema.

Prvi pristup podrazumeva sprovođenje postupka dijagnostike samo nakon detekcije promena stanja vibracija mašine posredstvom monitoringa, sa prevashodnim zadatkom tumačenja uočenih promena. Međutim, monitoring se po pravilu sprovodi na niskim i srednjim frekvencijama vibracija koje odgovaraju nastanku razvoja najvećeg broja oštećenja, jer postojanje ozbiljnih oštećenja dovodi do jasno uočljivih i primetnih promena energetskih parametara vibracija koje prekoračuju njihove uobičajene fluktuacije uslovljene promenom radnog režima.

Drugi pristup podrazumeva upotrebu metoda i sredstava dijagnostike pomoću kojih je moguće otkriti osnovne tipove oštećenja u njihovoj početnoj fazi, pre nastanka bitnih energetskih promena u signalu vibracija mašine. Detekcija oštećenja u fazi njihovog nastanka omogućava posmatranje njihovog razvoja i pravovremeno planiranje aktivnosti (programa) održavanja i potrebnog ljudstva i opreme za popravku mašine. Ovaj pristup se često naziva monitoringom

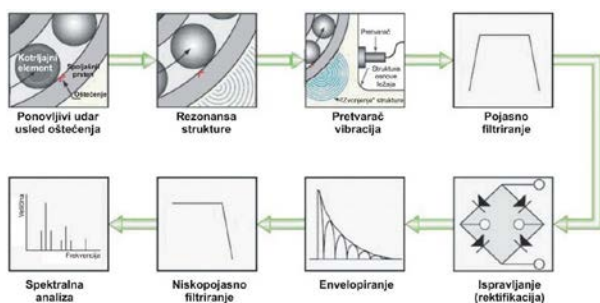
oštećenja i može se sprovoditi tokom više godina, sve dok kombinacija oštećenja svojim razvojem i brojem ne ukažu na stanje koje se smatra opasnim ili kritičnim. Svakako da je ovakav pristup moguć samo ukoliko je moguće detektovati i identifikovati sva potencijalna oštećenja i nepravilnosti u ranoj fazi njihovog razvoja. Intenzivni razvoj metoda i tehničkih sredstava dijagnostike, a naročito dijagnostike pomoću signala vibracija, učinio je da u današnje vreme široka primena sistema za monitoring oštećenja postane realnost.

Kod rotacionih delova se za detekciju oštećenja koja su u začetku koriste uobičajeni dijagnostički pokazatelji (simptomi), definisani spektralnom analizom samog signala vibracija ili oscilacijama snage njegovih komponenta, odnosno spektralnom analizom ovojnice signala vibracija (envelope). Na primer, osnovni pokazatelj oštećenja ležaja je promena karakteristika sila trenja i vibracije visokih frekvencija koje se time pobuđuju (sl. 1). Ove promene su posledica bilo pojave mikro-udara ili periodičnih promena koeficijenta trenja na oštećenoj kontaktnoj površini trenja i detektuju se vrlo jednostavno spektralnom analizom envelope signala vibracija visokih frekvencija na kućištu ležaja, pobuđenih silama trenja.



Sl. 1 Oštećenje spoljnog prstena izaziva udarne impulse koji se prostiru kroz komponente ležaja i mašinsku strukturu [5]

Nakon izvršene detekcije oštećenja i nepravilnosti u radu pojedinih mehaničkih prenosnika, a naročito zupčanika, kaišnika, elastičnih spojnika itd., posebnu pažnju treba obratiti na simptome oštećenja nastalih usled dinamičkih opterećenja koja deluju na transmisione elemente, npr. ležajeve. Ova opterećenja prvo dovode do povećanja određenih komponenata signala vibracija, i drugo, do fluktuacija sila trenja u ležajevima, na osnovu čega dolazi do oscilovanja vrednosti snage vibracionih signala na visokim frekvencijama. Na taj način je kombinacijom rezultata merenja spektra vibracija i spektra envelope moguće detektovati i identifikovati oštećenja mehaničkih prenosnika u početnoj fazi razvoja (sl. 2).



Sl. 2 Postupak envelopiranja signala vibracija [9]

Osnovni dijagnostički simptomi oštećenja protočnih elemenata rotacionih mašina, poput radnih kola centrifugalnih pumpi i kompresora, kao i lopatičnih kola turbina, veoma su slični simptomima oštećenja mehaničkih prenosnika i ležajeva, a posledica su promena karakteristika turbulentnog strujanja u oblasti razvodnika i radnog kola. Pulsacije pritiska koje nastaju na tim mestima prvenstveno pobuđuju vibracije visokih frekvencija i potom stvaraju dinamička opterećenja koja deluju na ležajeve, tako da se oštećenja nastala protokom fluida mogu detektovati paralelnom analizom spektra mašinskih vibracija i spektra envelope vibracija visokih frekvencija na kućištima radnih kola i ležajeva. Sile trenja u ležajevima i pulsacije pritiska pri proticanju gasova i tečnosti, usled postojanja mnoštva oštećenja i nepravilnosti, znatno menjaju radne karakteristike mašina i pojedinih elemenata. Međutim, sva oštećenja ne moraju da potiču neposredno od rotacionih mašina. Tako, na primer, pojedina oštećenja električnih mašina utiču na promene parametara magnetnog polja, usled čega dolazi do dejstva dodatnih sila i promenljivih momenata na rotor mašine. Budući da u električnim mašinama bez oštećenja ne postoje pulsacioni momenti, pomoću pulsacionih momenata i vibracija koje oni pobuđuju moguće je vrlo efikasno detektovati oštećenja električnih mašina u ranoj fazi nastanka. Spektralna analiza vibracija električnih mašina na niskim i srednjim frekvencijama, izmerenih u različitim pravcima, omogućava identifikaciju skoro svih oštećenja magnetnih uređaja elektronskih mašina, osim slabljenja i propadanja izolacije, sve do trenutka probijanja izolacije magnetnog polja i time nastalih promena vibracija mašine.

Jedna od karakteristika vibracija je mogućnost njihovog korišćenja za detekciju oštećenja rotora, naročito kod rotacionih mašina koje rade na velikim brzinama i koje su osetljive na promene vrednosti i strukture centrifugalnih sila. U zavisnosti od vrste oštećenja dolazi do povećanja vibracija na niskim frekvencijama i promene spektralnog sadržaja. Ova osobina vibracija se koristi za identifikaciju vrste oštećenja ili nepravilnosti.

Prema tome, signali vibracija omogućavaju detekciju praktično svih tipova oštećenja rotacionih mašina u ranoj fazi njihovog nastanka, bez potrebe za drugim fizičkim postupcima dijagnostike (pomoću pritiska, temperature, ...), što znači da se za održavanje i popravku opreme u realnim uslovima mogu koristiti prenosni sistemi za dijagnostiku stanja pomoću vibracija koji u postupku održavanja ne zahtevaju postojanje stalno postavljenih (fiksiranih) pretvarača na mašinama ili njihovim delovima.

VIBRODIJAGNOSTIKA ROTACIONIH MAŠINA

Monitoring stanja mašina primenom vibrodijagnostike omogućava praćenje promena u radu mašine na dva načina:

1. Merenjem nivoa ukupnih (opštih) vibracija mašine, praćenjem njegove promene i trenda rasta tokom vremena, imajući pritom u vidu dozvoljene vrednosti nivoa opštih vibracija za datu grupu i vrstu mašina predviđene odgovarajućim standardom, i
2. Vršanjem frekvencijske analize na fiksnim mernim tačkama na mašini i upoređivanjem dobijenog individualnog spektra sa referentnim spektrom, zabeleženim kada je mašina bila u dobrom stanju. Promene nivoa komponenata spektra na pojedinim frekvencijama mogu biti pokazatelj poremećenog stanja određenih delova mašine.

U tom smislu, svrha merenja vibracija nije određivanje nivoa vibracija koji neki deo sistema može da izdrži pre nego što otkaze, već predstavlja mogućnost da se postigne odgovarajuća opomena u pogledu postojanja određenih smetnji i nepravilnosti koji se mogu eliminisati pre nastanka otkaza. Utvrđivanje apsolutnih tolerancija vibracija za mašinu, ili graničnih vrednosti vibracija za bilo koji njen deo je praktično nemoguće s obzirom na priličnu složenost analize neispravnosti i otkaza, pri čemu prethodna iskustvena saznanja mogu da pomognu samo u dobijanju izvesnih realnih smernica. Prilikom utvrđivanja prihvatljivih nivoa vibracija potrebno je razmotriti iskustvene podatke i činioce kao što su: bezbednost radnika, troškovi otklanjanja neispravnosti, troškovi usled zastoja u proizvodnji, važnost sistema u tehnološkom lancu proizvodnje i dr.

Objekte dijagnostike predstavljaju iste mašine i oprema čije se stanje prati i ispituje sistemima za monitoring stanja pomoću vibracija. Dijagnostika stanja pomoću

vibracija se vrlo često koristi kako za kontrolu kvaliteta procesa proizvodnje ili remonta, tako i za kontrolu kvaliteta mašinskih sklopova – detekciju oštećenja novih (ili remontovanih) mašinskih delova, ili za detekciju i praćenje razvoja oštećenja i defekata na njima u toku eksploatacije. Za svaki od navedenih slučajeva mogu se koristiti različite dijagnostičke metode. U poslednjem slučaju se dijagnostička merenja mogu izvoditi bez bilo kakvih izmena radnih uslova (režima rada) objekta dijagnostike.

Suprotno monitoringu, dijagnostika stanja mašinske opreme pomoću vibracija nije namenjena za detekciju promena stanja vibracija, već za detekciju promena stanja i predviđanje (predikciju) stanja mašine, kao i svakog njenog elementa koji ima realnu verovatnoću otkaza u periodu između dva postupka održavanja. Iz tog razloga je, pored merenja vibracija na niskim i srednjim frekvencijama, potrebno vršiti i merenja vibracija na visokim frekvencijama, pa je time i postupak analize vibracija, koji omogućava dobijanje svih neophodnih dijagnostičkih informacija, daleko složeniji od samog postupka monitoringa. Vibracije se mere na svakom elementu čije stanje treba utvrditi, ili bar u tačkama na kojima se vibracije visokih frekvencija, koje potiču od elementa čije stanje treba utvrditi, prepoznaju na drugim elementima koji su pristupačni za merenje vibracija. Uređaji za merenje i analizu vibracija mogu biti jednokanalni.

Dugi niz godina su se metode za kontrolu i dijagnostiku mašina pri upotrebi bilo kojeg dijagnostičkog signala zasnivale na upoređivanju veličine (amplitude) izmerenog signala ili njegovih komponenata sa nivoima koji označavaju loše i dobro stanje mašine. Sistemi za kontrolu i dijagnostiku stanja mašina konstruisani na bazi takvih metoda vrše izbor pojedinih informacija od značaja iz merenog signala i određuju vreme kada će oni prekoračiti unapred utvrđene nivoe. Svako prekoračenje unapred utvrđenih nivoe se registrovalo kao nepravilnost. Tipovi nepravilnosti su definisani na osnovu sadržaja komponenata spektra koje su premašile određene nivoe. Savremeni sistemi za monitoring stanja vode poreklo od sistema za kontrolu i do skora su bili zasnovani na tim načelima, dok danas neki od njih omogućavaju ne samo kontrolu amplitude parametara, već takođe i analizu trendova tih parametara, pa čak i predviđanje datuma kada će ti parametri prekoračiti nivoe neispravnosti. Pri tome, zadatak korisnika sistema za monitoring stanja je tumačenje nastalih promena u stanju mašine, detektovanih i predviđenih pomoću tog sistema.

Pokušaj stroge podele sistema na sisteme za monitoring stanja i sisteme za dijagnostiku stanja mašina može biti izveden prema osnovnoj razlici u mogućnosti sistema da izvrši podelu svih promena stanja mašine u dve grupe:

1. Povratne promene stanja, koje nastaju usled promene radnog režima mašine i radnih uslova, i
2. Nepovratne promene stanja, koje nastaju usled oštećenja.

Nažalost, većina sistema za monitoring stanja ne omogućava potpuno rešenje ovog problema, zbog čega za podelu promena stanja na povratne i nepovratne promene pre treba koristiti sisteme za dijagnostiku stanja nego sisteme za monitoring stanja. U tom pogledu, stepen integracije dijagnostičkih sistema u sisteme za monitoring stanja treba smatrati jednom od glavnih karakteristika dijagnostičkih sistema.

Nivo potrebne obuke dijagnostičkih operatera predstavlja drugo veoma bitno svojstvo sistema za dijagnostiku stanja. Uzimajući nivo obuke operatera kao kriterijum, dijagnostički sistemi se mogu podeliti u tri grupe:

1. Profesionalne dijagnostičke sisteme, u kojima operateri biraju dijagnostičke tehnike i mernu opremu. Iskustvo i znanje operatera u potpunosti određuju dubinu (detaljnost) i preciznost (tačnost) dijagnostike stanja i predikcije.
2. Ekspertske dijagnostičke sisteme, koji pružaju odgovore na karakteristična pitanja operatera, tj. pomažu mu u nalaženju rešenja u konkretnim situacijama. Ekspertske sisteme mogu koristiti operateri sa posebnom obukom, bez ekspertskog znanja i iskustva.
3. Automatske dijagnostičke sisteme, zasnovane na metodama koje omogućuju automatsku (samostalnu) dijagnostiku. Ovakvi sistemi definišu operateru mernu putanju i ne zahtevaju neku posebnu dijagnostičku obuku. Naime, da bi radio sa automatskim dijagnostičkim sistemima, operateru sa osnovnim poznavanjem rada na računaru je sasvim dovoljno dva do tri dana obuke.

Dakle, metode dijagnostike stanja pomoću vibracija treba klasifikovati u metode za monitoring stanja u skladu sa tehničkim zahtevima za njihovom integracijom i problemima korisnika dijagnostičkih sistema na koje nailazi u radu. Ništa manje bitni su zahtevi za obradu dijagnostičkih merenja i dubinu (detaljnost) dijagnostifikovanja stanja mašina.

Uzimajući u obzir navedene zahteve, postojeće dijagnostičke metode se mogu podeliti u sledeće grupe:

- Dijagnostike montaže (sklapanja i instaliranja) mašina,
- Dijagnostike stanja pomoću monitoringa,
- Metode spojene (združene) dijagnostike i monitoringa stanja,
- Dijagnostičke i predikcione metode pomoću periodičnih merenja vibracija, i
- Dijagnostika stanja i predikcija na osnovu samo jednog merenja vibracija.

Dijagnostika montaže mašina se primenjuje u toku sklapanja i neposredno nakon instaliranja mašine i puštanja u rad, a naročito tokom balansiranja mašina u pogonskim uslovima. Ove metode dijagnostike ne zahtevaju bilo kakve podatke od sistema za monitoring stanja i korišćene su u prenosivim dijagnostičkim sistemima ili u pultovima za kontrolu proizvoda.

Karakteristika ovih metoda je mogućnost delimičnog korišćenja test-dijagnostičkih metoda kao vrlo podesnih. Na primer, dodatne centrifugalne sile, koje nastaju nakon montaže probnih tegova i uravnotežavajućih masa u odgovarajuću ravan mašine u toku postupka uravnotežavanja, mogu biti smatrane test-signalima. Dinamičke sile promenljivih frekvencija, koje nastaju u toku rada neispravnih mašina, takođe mogu biti smatrane test-signalima.

Od tehničkih podataka koji su neophodni u razmatranim dijagnostičkim metodama, neophodno je istaći početnu fazu. Podaci o početnoj fazi se po pravilu obezbeđuju iz spektra i njegove envelope.

Zadatak dijagnostičkih sistema koji koriste navedenu tehniku je pre svega detekcija različitih tipova nesaosnosti vratila. Drugi zadatak je pronalaženje mogućih uzroka umanjivanja efikasnosti uravnotežavanja mašine. Na primer, ukoliko na mašini postoje neke nepravilnosti, može biti više od deset razloga za pojavu vibracija na frekvenciji rotacije mašine koji će ometati uravnotežavanje. Takođe, potrebno je pronaći i ostale nepravilnosti koje su nastale usled grešaka u proizvodnji i montaži različitih delova i sklopova.

Zadatak razvoja automatskih dijagnostičkih sistema za montažu mašina se obično ne poverava programerima. Uravnotežavanje mašina uobičajeno rade obučeni profesionalci koji uz to mogu biti u stanju i da izvrše dijagnozu mašine upotrebom ekspertske tehnike.

Metode za dijagnostiku stanja na osnovu rezultata monitoringa su zasnovane na informacionim tehnikama koje su korišćene za kontrolu stanja vibracija na ograničenom broju kontrolnih tačaka i po pravilu se izrađuju u formi profesionalnih ili ekspertske sistema. Dijagnostički rezultati dobijeni ovim metodama nisu vrlo detaljni, odnosno ne podrazumevaju sprovođenje dubinske dijagnostike i obično se primenjuju za definisanje programa daljeg, naprednijeg i opširnijeg proučavanja identifikacije detektovanih promena stanja vibracija.

Metode spojene (združene) dijagnostike i monitoringa stanja se široko primenjuju u sistemima za kontinualni monitoring i dijagnostiku, imajući u vidu da obezbeđuju višu preciznost (klasu tačnosti) dijagnostičkih rezultata u odnosu na prethodne metode. Veća pouzdanost rezultata je postignuta povećanjem broja mernih tačaka.

Najčešće primenjivane metode ovog tipa imaju potpuno odvojene funkcije monitoringa stanja i dijagnostike stanja, pa se i sistemi koji su zasnovani na ovim metodama sastoje od dva odvojena dela. Prvi deo, sa stacionarno (trajno) postavljenim pretvaračima vibracija na mašini, obezbeđuje kontinualni monitoring stanja kojim se detektuju promene u stanju vibracija mašine i među njima pronalaze one koje ukazuju na nepovratne (trajne) promene stanja mašine i, ukoliko je potrebno, vrši predikciju njihovog razvoja. Nakon toga, ukoliko se donese odluka o produžetku rada mašine, na scenu stupa i startuje drugi deo sistema monitoringa i dijagnostike stanja, kojim se rešava zadatak

identifikacije detektovanih nepovratnih promena i, ukoliko je moguće, predikcije razvoja nepravilnosti i oštećenja. Drugi deo sistema može raditi off-line zbog činjenice da je ponekad za identifikaciju neispravnosti potrebno izvršiti dodatna merenja vibracija na mestima gde se očekuje da bi neispravnost mogla proizvesti najveće posledice.

Savremeni sistemi za monitoring stanja mogu takođe da koriste dijagnostičke metode za identifikaciju neispravnosti pri promenljivim režimima rada mašine. Takva kombinacija monitoringa i dijagnostike stanja povećava višestruko kvalitet rezultata dijagnostike, budući da promene režima rada vrlo često utiču na promene većine dijagnostičkih simptoma (pokazatelja) neispravnosti. Istovremeno, dijagnostički postupak je komplikovaniji i zahteva visoku obučenosť eksperata ili više sofisticiranih sistema za automatsku dijagnostiku mašina. Ovakav način su izabrale i podržavaju vodeće svetske kompanije u proizvodnji sistema za automatski monitoring i dijagnostiku (sl. 3).



SL3 Brüel&Kjær Data Collector 2526 [10]

Sofistikacija metoda za monitoring i dijagnostiku stanja vodi ka povećanju broja mernih tačaka i time do povećanja cene sistema. Sa ekonomskog gledišta, optimalni sistem za kontinualni monitoring i dijagnostiku stanja mora imati mogućnost istovremenog (paralelnog) i sinhronizovanog (usaglašenog) sprovođenja zasebnih funkcija monitoringa i dijagnostike. Granični broj kontrolnih tačaka za monitoring i dijagnostiku stanja nekog elementa ili mašine može biti izabran na način da to nisu obavezno najsnažniji izvori vibracija na mašini, ali da to budu u svakom slučaju tačke koje će verodostojno i pouzdano reprezentovati trenutno stanje mašine i pomoću kojih se može odrediti njen životni ciklus (preostali radni vek). Najčešće su to tačke na kućištima ležajeva. U slučaju mašina koje rade sa velikim brojem obrtaja, kod kojih su ležajevi glavni izvori vibracija, dodatno se mogu koristiti dve do tri kontrolne tačke na kućištu mašine, koje su dosta udaljene od sekcije ležaja. Zadatak monitoringa stanja je uvek detekcija promena stanja vibracija mašine i njenih delova pomoću merenja koja se često ponavljaju. Pri detekciji i najmanjih promena, sistem za dijagnostiku stanja startuje i počinje da vrši potpuna dijagnostička merenja pomoću stacionarnih (fiksno postavljenih) pretvarača vibracija. Samo u slučaju kada podaci dobijeni monitoringom i dijagnostički podaci nisu dovoljni za

identifikaciju uzroka detektovanih promena, rešenje se postiže vršenjem dodatnih merenja posredstvom off-line instrumenata koji su obuhvaćeni kombinovanim (združenim) sistemom za monitoring i dijagnostiku stanja.

Dijagnostičke i predikcione metode pomoću periodičnih merenja vibracija. Većina nepravilnosti (oštećenja) koje se javljaju i razvijaju u mašinskim delovima počinju da utiču na opštu sliku (sastav) vibracija mašine nekoliko meseci pre nastupanja situacije u kojoj može doći do otkaza mašine praćenim ozbiljnim oštećenjima i havarijama. Izuzetak su pojedine neispravnosti usred neadekvatnog sklapanja (montaže) ili neispravnosti usled nepoštovanja uputstava za rad i upotrebu mašine. One se mogu pojaviti u bilo kojoj fazi životnog ciklusa mašine i razvijati vrlo brzo, sve do nastanka samog otkaza mašine i mogućih pratećih opasnih situacija. Ukoliko se ove neispravnosti izostave ili ih jednostavno nema, tada nije potrebno vršiti vrlo česta merenja, čime se stvara mogućnost i povoljna prilika za primenu off-line sistema za mašinsku dijagnostiku. Ovi sistemi zahtevaju periodična (povremena) merenja u intervalima od nekoliko sedmica ili čak i više meseci. Kao i kod metoda monitoringa stanja, metode dijagnostike i predikcije stanja se zasnivaju na različitim kombinacijama dijagnostičkih tehnika i obično su namenjene iskusnim, kvalifikovanim i stručnim analitičarima. Najbolji rezultati se postižu metodama koje se zasnivaju na kombinaciji (spoju) tehnika analize spektra i njegove obvojnice (envelope).

Za razmatranje problema ovom grupom dijagnostičkih metoda potrebno je detaljno poznavanje procesa razvoja neispravnosti i njihovog uticaja na parametre vibracija svih tipova mašina čija se dijagnostika sprovodi. Kako su ove metode zasnovane na uporednoj analizi rezultata merenja koja se vrše u različitim trenucima vremena (vremenskim razmacima), one zahtevaju merenja vibracija izuzetno visokog kvaliteta koja mogu obavljati samo vrlo iskusni tehničari, što sa druge strane ograničava dijagnostičke mogućnosti i njenu efikasnost. Poseban problem predstavlja zadržavanje istog režima rada mašine tokom sprovođenja dijagnostike, jer u suprotnom nije moguće efikasno detektovati promene stanja mašina. Razvoj metoda za dijagnostiku i predikciju stanja u automatsku dijagnostiku i predikciju stanja na osnovu periodičnih merenja vibracija suočen je sa istim problemima kao i u slučaju metoda koje zahtevaju donošenje odluka od strane operatora. Najveći problem je izbor merenja sa zadovoljavajućom preciznošću, naročito ako se ona razlikuje u odnosu na prethodna merenja. Izbor će tim pre biti teži ukoliko se uzme u obzir da za promenu stanja (oblika) vibracija mašine može postojati više razloga, koji ne moraju biti obavezno razvoj nepravilnosti (oštećenja), već to mogu da budu i promene radnog režima mašine, greške operatera u izboru položaja merne tačke, ili pogrešno pričvršćivanje pretvarača. Pritom, kod najvećeg broja mašina je skoro nemoguće zadržati i obezbediti isto

opterećenje, brzinu obrtanja i spoljašnje uslove od merenja do merenja, posebno ako se merenja vrše (ponavljaju) nakon dužih vremenskih intervala, npr. nakon više nedelja ili meseci. Uprkos navedenim teškoćama, metode automatske dijagnostike mašinske opreme na osnovu periodičnih/povremenih merenja vibracija su razvijane u mnogo zemalja, tako da danas postoji veliki broj dijagnostičkih sistema koji efikasno koriste ove metode.

Metode dijagnostike i predikcije stanja na osnovu samo jednog merenja vibracija su vrlo popularne, ali i komplikovane metode, zasnovane na različitim kombinacijama dijagnostičkih tehnika i u većini slučajeva ih mogu koristiti samo iskusni eksperti. Osobenost ovih metoda je da se dijagnostika mašine vrši pomoću dijagnostike delova (sklopova) mašine ili njenih pojedinih delova ukoliko su oni izvori vibracija. Najveća efikasnost se postiže maksimalnom upotrebom tehnika analize spektra i envelope od strane eksperata. Svaka dijagnostička metoda na osnovu samo jednog merenja vibracija zahteva od eksperta vrlo detaljno, dubinsko poznavanje osobenosti razvoja neispravnosti i napredovanja oštećenja, kao i njihovog uticaja na vibracije objekta čija se dijagnostika vrši. Neophodno je poznavati sve postojeće dijagnostičke simptome i nivoe za određene vrste i tipove mašina, što se može rešiti postojanjem eksperata za određenu vrstu mašina ili dijagnostičkim metodama koje se razvijaju za određenu vrstu mašinskih sklopova ili mašinskih elemenata.

U poslednje vreme se naročita pažnja poklanja specijalizovanim dijagnostičkim metodama, sposobnim za automatsko (samostalno) vršenje dijagnostike stanja mašine i njenih delova. Prva od automatizovanih metoda bila je namenjena dijagnostici kotrljajnih ležajeva pomoću envelope spektra visokofrekvencijskih vibracija koje su pobuđene silama trenja unutar sklopa čija se dijagnostika vrši. Danas postoje konstrukcije sistema za automatsku dijagnostiku zupčastih mehanizama, naročito menjača, koje se baziraju na samo jednom merenju vibracija. Ove metode čine osnovu za stvaranje sličnih dijagnostičkih sistema za dijagnostiku radnih kola pumpi i turbina. Svaka od njih je zasnovana na tehnici envelope dopunjenoj spektralnim tehnikama. U najskorije vreme se očekuju i sistemi za dijagnostiku na osnovu samo jednog merenja kod električnih mašina koje rade sa naizmeničnom strujom.

Metode detaljne dijagnostike na osnovu samo jednog merenja vibracija još uvek ne dozvoljavaju rešavanje problema dijagnostike i dugoročne predikcije stanja za sve delove mašine, pa na taj način i mašine kao celine. Izuzetak su delovi koji se najčešće kvare i otkazuju, a naročito kotrljajni elementi ležajeva, za koje su sistemi dijagnostike i predikcije stanja planirani i uspešno se koriste više godina, a zasnovani su na metodama detaljne dijagnostike stanja na osnovu jednog merenja vibracija. Ove metode se mogu koristiti u sistemima za monitoring stanja i predstavljati osnovu sistema koji vrše identifikaciju uzroka detektovanih promena.

Naime, ovim metodama je na osnovu stanja (oblika) vibracija moguće izvršiti razdvajanje povratnih od nepovratnih promena, kao što je npr. razdvajanje promene u režimu rada od trajnih oštećenja i neispravnosti, i na taj način smanjiti broj lažnih alarma koje stvara sistem za monitoring stanja.

ZAKLJUČAK

Celokupan dijagnostički pristup polazi od činjenice da svaki poremećajni uzročnik generiše vibracije tačno određenog karaktera, prepoznatljive pre svega po frekvenciji kao ključnom parametru. Pri tome se identifikacija dominantnih parcijalnih komponenata, registrovanih u području vremenskog ili frekvencijskog domena, zasniva na korišćenju asimiliranog znanja i iskustva o specifičnim karakteristikama potencijalne slike oscilovanja pokretnih, najčešće rotirajućih mašinskih delova. Za mnoštvo vitalnih rotirajućih mašinskih delova, pored osnovne frekvencije i njenih viših harmonika, egzaktnim matematičkim putem definisan je niz prinudnih i sopstvenih frekvencija kojima mogu odgovarati i dominantne komponente u snimljenim spektrima. Kada se radi o održavanju mašinskih sistema, ključna je činjenica da brojna vrednost nivoa vibracija u suštini nije odlučujuća, već vibracioni trend kao saznanje kako se menja stanje mašine, odnosno kako se sa vremenom menjaju unutrašnje sile u konstrukciji, pospešujući oštećenja pojedinih delova mašinskih sklopova. Promena intenziteta unutrašnjih sila može biti izazvana direktnim promenama u procesu rada ili promenama osobina delova mašina. Njihovo najbolje uočavanje se postiže upravo frekvencijskom analizom.

LITERATURA

- [1] Adamović Ž.: „Totalno održavanje tehničkih sistema”, III izdanje, OMO, Beograd, 2002.
- [2] Adamović Ž.: „Tehnička dijagnostika”, OMO, Beograd, 2001.
- [3] Adams L. Maurice, Jr.: „Rotating machinery vibration”, Marcel Dekker Inc., New York, USA, 2001.

- [4] Barkova N. A.: „The Current State of Vibroacoustical Machine Diagnostics”, VibroAcoustical Systems and Technologies (VAST, Inc.), St. Petersburg, Russia, 1998.
- [5] Courrech J.: „Envelope analysis for effective rolling-element bearing fault detection – fact or fiction?”, Application Note BAN0024-EN-11, Brüel&Kjær, Denmark
- [6] ISO 2041: Mechanical vibration and shock
- [7] Kelly S. G.: „Mechanical Vibrations”, McGraw-Hill Inc., USA, 1996.
- [8] Ličen H., Zuber N.: „Prediktivno održavanje rotirajuće opreme na bazi merenja i analize mehaničkih vibracija”, „Tehnička dijagnostika” - god.VI - br.1, Beograd, 2007.
- [9] Weller N. : „Acceleration Enveloping – higher sensitivity, earlier Detection”, Orbit, USA, 2004
- [10] ***: „Technical Documentation: SENTINEL™ Machine Monitoring Software Type 7107 – Operators Manual”, BE 1402-13, Brüel&Kjær CMS A/S, 1998.
- [11] ***: „Systematic Machine Condition Monitoring”, Lecture Note BA 7324-11, Brüel&Kjær Sound and Vibration Measurement A/S, Norcross, Georgia, USA, 1998.
- [12] ***: „Vibration Measurement and Analysis”, Lecture Note BA 7676-12, Brüel&Kjær Sound and Vibration Measurement A/S, Norcross, Georgia, USA, 1998.

BIOGRAFIJA

Darko Mihajlov je rođen 1969. god. u Nišu. Diplomirao je na Mašinskom fakultetu u Nišu, na smeru Hidroenergetika. Magistrirao je na Fakultetu zaštite na radu u Nišu na temu primene vibrodijagnostike u preventivnom održavanju rotacionih mašina. Pored toga, profesionalno se bavi i problemima buke u radnoj i životnoj sredini u okviru delatnosti Laboratorije za buku i vibracije Fakulteta zaštite na radu u Nišu. Trenutno je angažovan u delu realizacije nastave iz više predmeta na osnovnim i master studijama Fakulteta zaštite na radu u Nišu. Autor je i koautor više od 50 naučnih i stručnih radova koji su objavljeni u naučnim i stručnim časopisima i saopšteni na naučnim skupovima.



ROTATING MACHINERY DIAGNOSTICS THROUGH VIBRATIONS

Darko Mihajlov, Momir Prašćević, Dragan Cvetković

Abstract: *Monitoring of the condition of machines and equipment is just one of the activities under technical maintenance for which the measurement and analysis of vibration is being done. In general, the use of vibrations is present in the realization of seven main groups of activities within the technical maintenance of mechanical systems. Each activity has certain limitations, both in terms of achieving set goals and tasks, as well as in terms of presenting the main characteristic features of vibrations in order to achieve optimal results.*

Key words: vibration, rotating machinery, fault, diagnostic.