

## Sistem za magnetni monitoring visokonaponskih motora MM6212

Nenad Kartalović<sup>1</sup>, Blagoje Babić<sup>1</sup>, Nikola Ilić<sup>1</sup>, Nikola Cakić<sup>1</sup>, Srđan Milosavljević<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu  
Koste Glavinića 8a, 11000 Beograd, Srbija  
[nenad.kartalovic@ieent.org](mailto:nenad.kartalovic@ieent.org)

**Kratak sadržaj:** U radu je prikazan uređaj za magnetni monitoring stanja asinhronih motora sa kavezim rotorom, razvijen u Institutu Nikola Tesla, Beograd. Uređaj je zasnovan na merenju rasutog magnetnog fluksa i spektralnoj analizi signala. Senzor rasutog magnetnog fluksa je vazдушna prstenasta zavojnica različitih prečnika koja se postavlja osno simetrično na poklopac kućišta motora. Elektromotorna sila na krajevima zavojnice, nastala kao posledica promene slabog magnetnog polja, je niske magnitude. Nakon neophodnih pojačanja i prilagođenja, signal se u akvizicionom delu digitalizuje i memoriše. Pogodnim algoritmima se vrši obrada signala, prvenstveno FFT analiza. Dobijeni rezultati se dalje analiziraju prema karakterističnim frekvencijama za date karakteristike motora, njegovog opterećenja i stanja. U radu su date neke karakteristične analize spektra signala rasutog magnetnog fluksa koje su deo dijagnostike stanja motora.

**Ključne reči:** magnetni monitoring, visokonaponski motor, spektralna analiza

### 1. Uvod

Magnetni monitoring motora se sve više koristi u praksi kao upotpunjavanje postojećeg dijagnostičkog sistema električnih motora. U INT razvijen je uređaj za magnetni monitoring stanja asinhronih motora sa kavezim rotorom, oznake MM6212. Zasniva se na merenju aksijalnog magnetnog fluksa i obradi signala i podataka na PC odnosno laptopu.

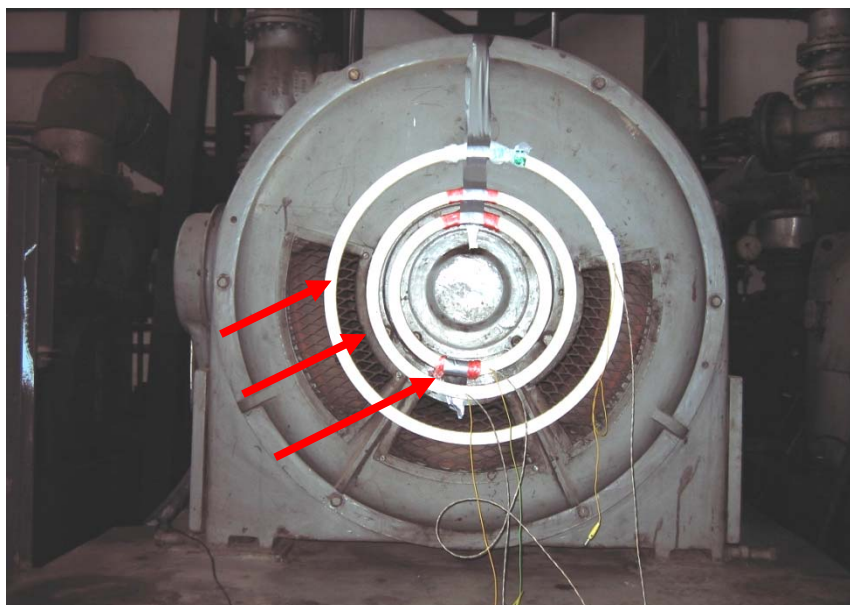
Različiti kvarovi na motoru dovode do specifičnih varijacija u frekventnoj raspodeli fluksa pa možemo zaključiti da je spektralna analiza pogodna za monitoring stanja motora.

Za procenu stanja motora neophodna su referentna merenja rasutog magnetnog fluksa ali i sva druga dijagnostička merenja i analize (na primer

analize povećanja temperature statorskih namotaja, analiza struje statora za električne kvarove, merenja vibracija za mehanička oštećenja itd.) [1].

Pomoću merenja aksijalnog magnetnog fluksa motora moguće je otkriti neke značajne kvarove [2]:

- prekinute rotorske šipke;
- prekinute krajnje prstenove rotora;
- nesimetriju napona napajanja;
- kratko spojene navojke u namotaju statora.

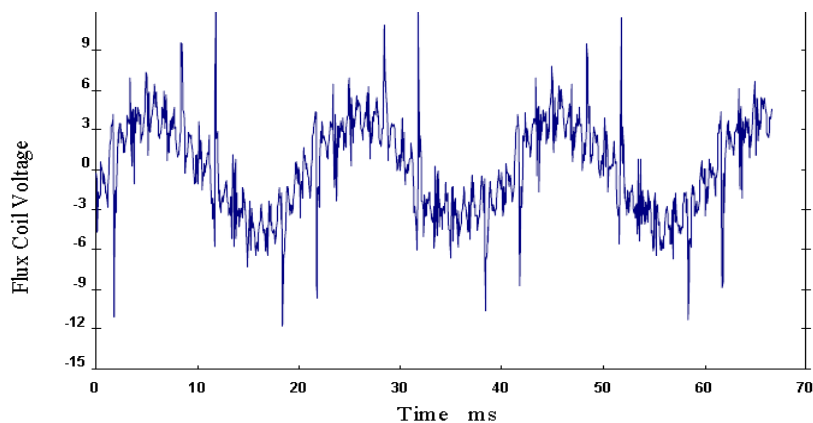


*Slika 1. Motor pumpe u TENT A. Na delu motora su postavljene tri prstenaste zavojnice (strelica) za detekciju rasutog magnetnog fluksa.*

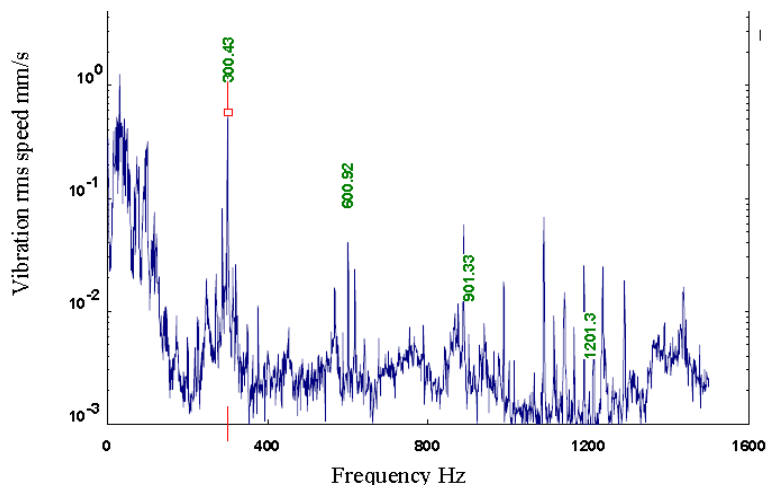
Na slici 1 prikazan je način postavljanja prstenastih namotaja za detekciju rasutog magnetnog fluksa na asihronom kavznom motoru za pumpu, TENT A [1].

Naponski odziv na aksijalni rasipni fluks kaveznog motora je vrlo složen, slika 2 [3]. Talasni signal ima osnovnu periodu od 20 ms, ali postoji mnogo superponiranih „poremećaja“ amplitude. Talasni oblici različitih signala su slični a može se uočiti i periodičnost ponavljanja različitih pikova napona.

Za adekvatnu dijagnostiku motora od posebnog je značaja praćenje mehaničkih vibracija od kojih su neke posledično povezane sa magnetnim disbalansima u motoru. Na slici 3. vidimo, pored niza mehanički izazvanih vibracija, i parne harmonike vibracija na frekvencijama od 300 Hz, 600 Hz, 900 Hz i 1200 Hz koje su izazvane pulsirajućim momentom proizvedenim neparanim harmonicima struje statora [3].



Slika 2. Naponski odziv na aksijalni rasipni fluks kaveznog motora, [3].



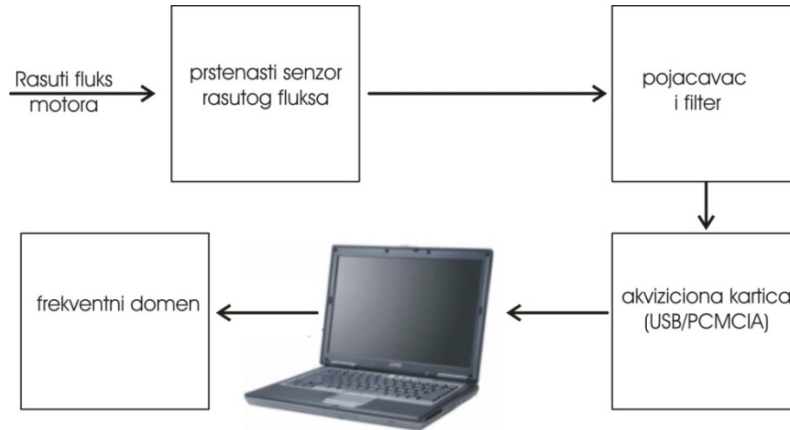
Slika 3. Merenje vibracija kod kaveznog indukcionog motora, [3].

## 2. Uređaj za magnetni monitoring

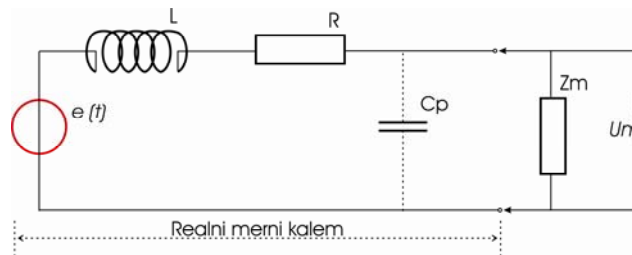
Uređaj za magnetni monitoring se sastoji od više celina, slika 4. To su: senzori rasutog magnetnog fluksa, akvizicioni sistem (analogno digitalni interfejs i računar) i više algoritama za merenja, akviziciju i obradu podataka.

### 2.1. Senzori rasutog magnetnog fluksa

Izrada vazdušnog kalema, iako tehnički jednostavna, zahteva izvesnu pažnju oko poznavanja njenih mogućnosti pogotovu ako se koristi u širem frekventnom opsegu. Ekvivalentno kolo vazdušne zavojnice dato je na slici 5.



Slika 4. Blok dijagram sistema za magnetni monitoring motora [1].



Slika 5. Ekvivalentno kolo vazdušne zavojnice [1].

Na slici 5. su:  $e(t)$  - indukovana elektromotorna sila,  $L$  - induktivnost,  $R$  - otpornost,  $C_p$  - parazitna kapacitivnost sonde. Na mernoj impedansi  $Z_m$  (za koju se najčešće uzima  $R_m$ ) dobijamo izlazni napon  $U_m$  sonde. Za datu frekvenciju  $f$  ( $\omega = 2\pi f$ ) predložena je jednačina za slabljenja  $|A|$  mernog kola [3]:

$$|A| = \left| \frac{U_m}{e(t)} \right| = \left[ \left( \frac{R_m + R}{R_m} - \omega^2 LC_p \right)^2 + \left( \omega \frac{L}{R_m} + \omega RC_p \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

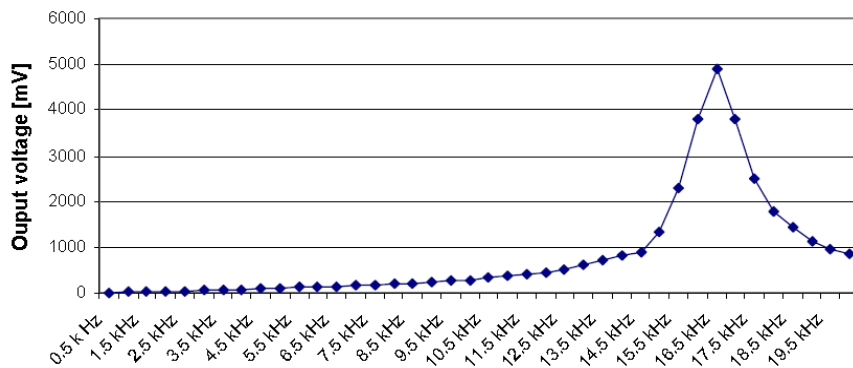
Pokazuje se da za više frekvencije  $\frac{R_m + R}{R_m} \ll \omega^2 LC_p$  i  $\frac{L}{R_m} \ll RC_p$  prethodna jednačina može biti svedena na:

$$|A| = \left[ (\omega^2 LC_p)^2 + (\omega RC_p)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Takođe, za niže frekvencije  $\frac{R_m + R}{R_m} \gg \omega^2 LC_p$  i  $\frac{L}{R_m} \gg RC_p$ , prethodna jednačina može biti svedena na:

$$|A| = \left[ \left( \frac{R_m + R}{R_m} \right)^2 + \left( \omega \frac{L}{R_m} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Korisno frekvencijsko područje fluksa izmerenog prstenastom vazdušnom zavojnicom je od 0.2 Hz do 15 kHz. Izlazni napon je frekvencijski zavisian (povećava se sa porastom frekvencije), slika 6. Za motore dovoljna osetljivost se obično dostiže prstenastom vazdušnom zavojnicom koja ima prečnik do 30 cm i brojem navojaka do 200. Osetljivost se može poboljšati povećanjem prečnika ili povećanjem broja navojaka vazdušne zavojnice. Senzor treba centrirati u aksijalnom pravcu na poklopcu motora, slika 1. Merenja treba vršiti pri opterećenom motoru u stabilnom radu a u nekim slučajevima pri zaletanju motora. Izlazni napon je reda mV. Ugrađivanjem drugačijih senzora unutar motora, izlazni napon se može povećati od reda V.



Slika 6. Izlazni napon senzora fluksa u opsegu od 0.5 kHz do 20 kHz [1].

## 2.2. Akvizicioni sistem

Akvizicioni sistem se sastoji od analognog digitalnog interfejsa za merenje i akviziciju kao i računara sa neophodnim softverom.

Kao akvizicioni analognog digitalni interfejs korišćena je elektronska kartica kompanije Nešnel Instruments (National Instruments) oznake NI USB-6212, M Series MIO DAQ, Bus-Powered. Analogno/digitalna konverzija ima rezoluciju 16 bita, 400 kS/s. Kartica ima: 16 analognih ulaza (16 bita, 400 kS/s), 2 analogna izlaza (16 bita, 250 kS/s), 32 digitalna (diskretna) ulaza/izlaza. Napaja se preko USB basa. Ima robusne konektore za spoljašnje veze.

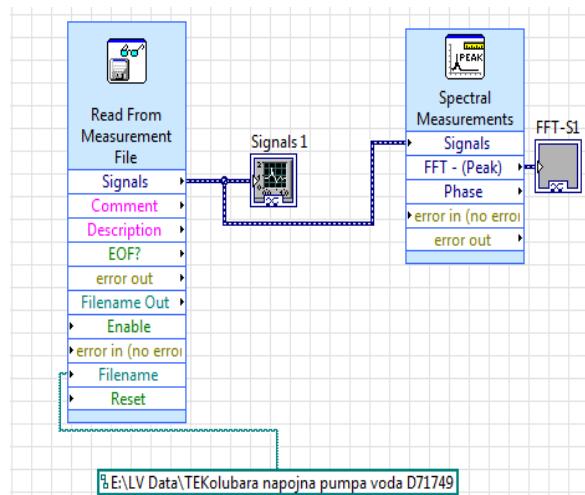
Kompatibilna je sa softverima LabVIEW, ANSI C/C++, C#, Visual Basic NET i Visual Basic 6.0. Ulazni opseg napona je programabilan, ( $\pm 0,2$  do  $\pm 10,0$  V). Kao pomoćni alat poseduje dva brojača/tajmera.

Akvizionica kartica je projektovana kao robusna terenska oprema. Prilagođena je korisniku za lako podešavanje parametara (Plug-and-play).

Program za laptop (PC) omogućava akviziciju, obradu signala, proračune, smeštanje u bazu podataka i omogućava analizu i prezentaciju rezultata magnetnog monitoringa. Usvojena je koncepcija sa više podprograma, koji predstavljaju nezavisne celine koje se mogu pokretati u zavisnosti od potreba, bilo na laptopu ili na PC.

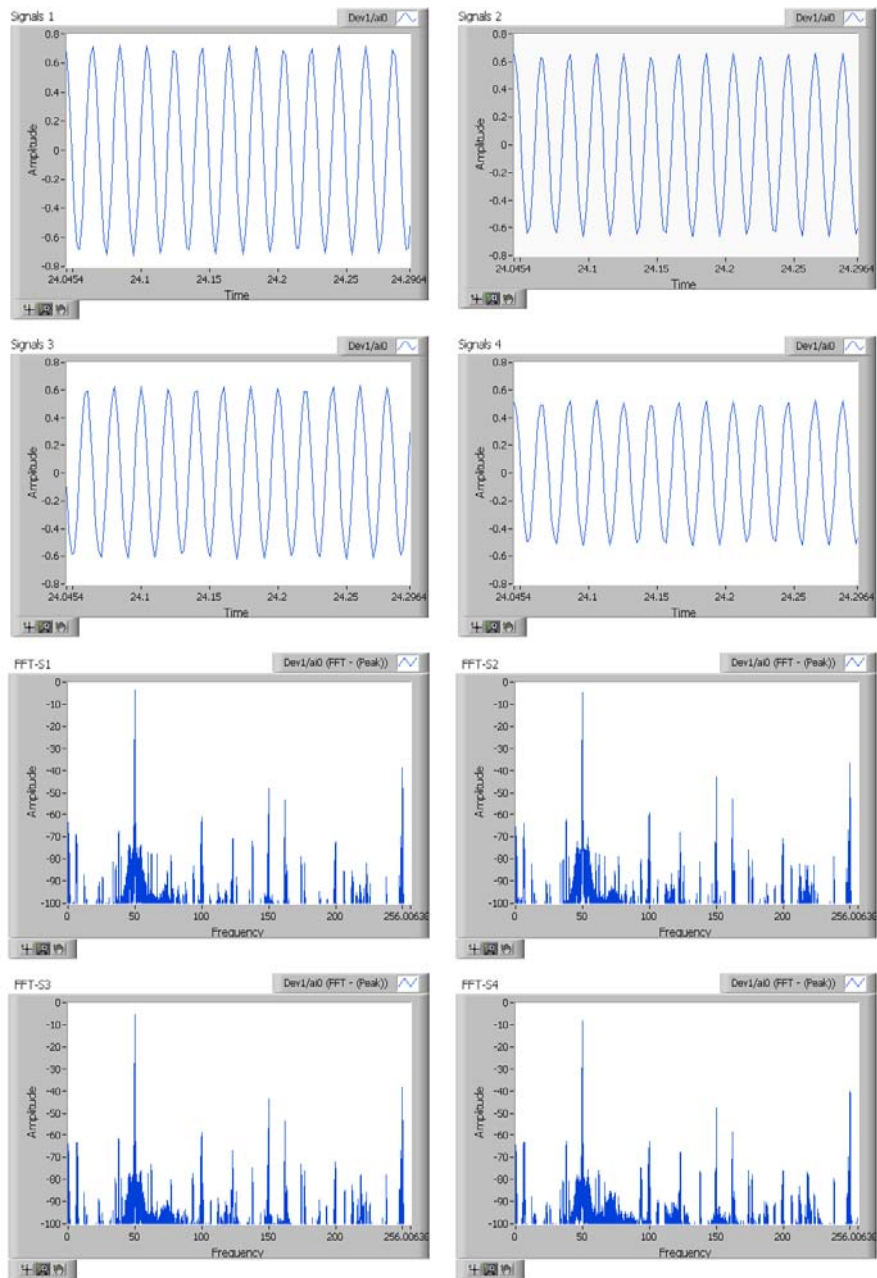
Kao osnovni softverski paket koristi se LabVIEW 7.1 koji omogućuje izradu potrebnih algoritama i kompatibilan je sa korišćenim hardverom.

Jedan deo kompleksnog algoritma za magnetni monitoring prikazan je na slici 7. Izrađen je u softverskom paketu Labvju (LabView). Početni blok „Read From Measurement File“ ima funkciju učitavanja prethodno snimljenih podataka, funkcije  $e(t)=f(t)$  i povezan je sa blokom „Integral (Sum[Xdt])“, za integraljenje učitane funkcije, odnosno dobijanje funkcije fluksa. Posle dodatnih obrada krajnji rezultati se prikazuju na grafiku pomoću bloka „FFT-S1“.



Slika 7. Deo blok dijagrama algoritma za obradu podataka dobijenih merenjem aksijalnog rasutog fluksa.

Na slici 8. data je prednja maska (front panel) algoritma za obradu podataka. Prva četiri polja *Signal1*, *Signal2*, *Signal3*, *Signal4* predstavljaju četiri različita vremensko-naponska signala dobijena sa četiri različita senzora (različiti prečnici zavojnica) sa kojima su vršena snimanja. Polja *FFT-S1*, *FFT-S2*, *FFT-S3*, *FFT-S4* su spektri datih signala respektivno. Na slici 8. data je prednja maska (front panel) algoritma za obradu podataka.

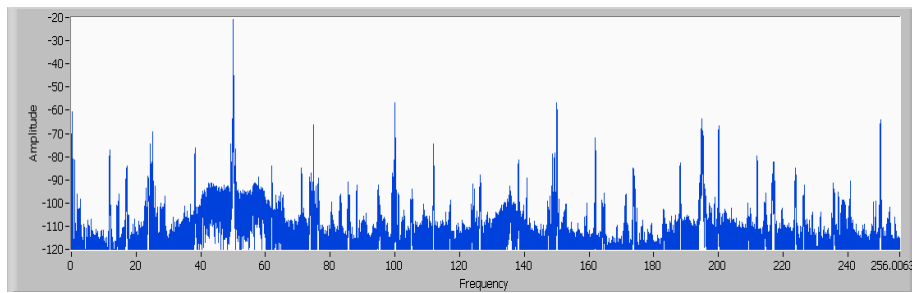


*Slika 8. Prednja maska (front panel) algoritma za obradu podataka. Polja Signal1, Signal2, Signal3, Signal4 su četiri vremensko-naponska signala sa četiri različita senzora. Polja FFT-S1, FFT-S2, FFT-S3, FFT-S4 su spektri datih signala.*

### 3. Spektralna analiza rasutog aksijalnog fluksa kod motora sa kratkospojenim rotorom

Struje statora i rotora su uzročno posledično povezane magnetnim poljem, tj struja rotora je posledica struja statora ali u struji statora postoje komponente struje koje su indukovane od strane magnetnog polja rotora. Njihova identifikacija je moguća pomoću frekventnog spektralnog analizatora visoke rezolucije. Mogu se analizirati struje statora metodom MCSA (*Motor Current Signature Analysis*) ili njihovih rasutih magnetnih flukseva metodom FSA (*Flux Signature Analysis*). Mogu se dobiti kvantitativni podaci za određene harmonike sa konačnim ciljem da se otkriju određene devijacije u spektru, odnosno kvarovi u motoru.

Na slici 9. prikazan je signal u širem frekvencijskom domenu dobijen merenjem na motoru 791729 B6, TE Kolubara. Prilikom dobijanja FFT analize korišćena je Hanningova prozorska funkcija. U dobijenom složenom spektru moguće je uočiti niz karakterističnih frekvencija, pored jasno izražene frekvencije napajanja od 50 Hz.



Slika 9. Signal magnetnog monitoringa, prikazan u frekvencijskom domenu dobijen za motor 791729 B6. Vrednost amplitude data je u decibelima.

Kod trofaznog indukcionog motora stvara se obrtno magnetno polje, koje se obrće sinhronom brzinom  $n_s$ :

$$n_s = \frac{f_s}{p} \quad (4)$$

gde je:  $f_s$  - učestanost napajanja i  $p$  - broj pari polova statorskog namotaja. Rotor se vrti u smeru kao i obrtno polje, stalnom mehaničkom brzinom  $n_R$  (odnosno rotacionom frekvencijom  $f_r$ ) manjom od sinhrona tako da se definiše klizanje:

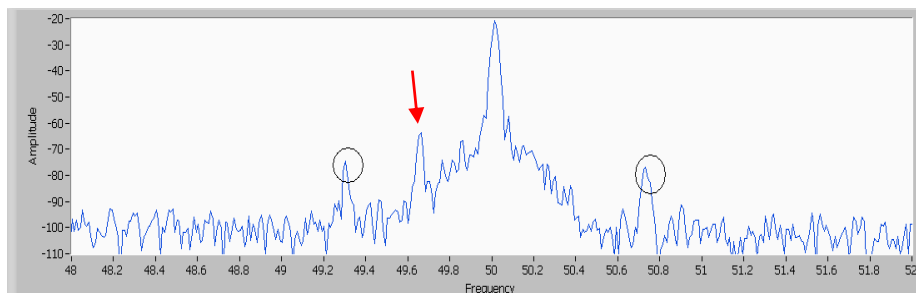
$$s = \frac{n_s - n_R}{n_s} = \frac{f_s - f_r}{f_s} \quad (5)$$

Zaostajanje rotora dovodi do indukovanja struja u njemu čija je učestanost klizanja  $f_k$ :



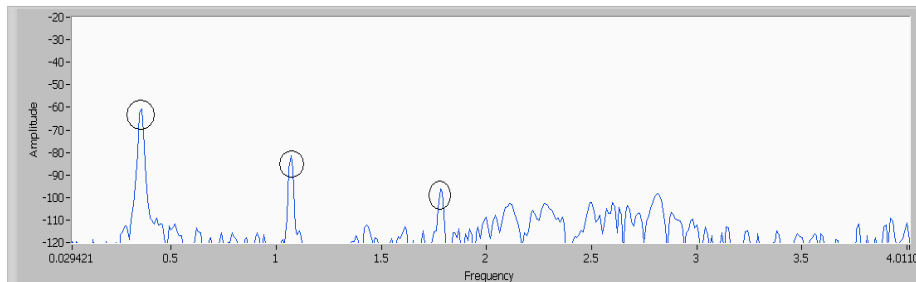
$$f_k = (n_s - n_R)p = sf_s \quad (6)$$

Učestanost struje rotora, učestanost vrtnje i broj žlebova rotora i statora dovode do kompleksne slike magnetnog fluksa. Na slici 10. dat je frekventno-naponski odziv sonde aksijalnog rasutog fluksa. Označene su rotorom uzrokovane bočne frekvencije (sideband) oko frekvencije napajanja (kružići, 49,29 Hz i 50,71 Hz). Na slici se može uočiti još jedna velika amplituda komponente učestanosti 49,66 Hz (strelica) koja je tipična za određene vrste izvedbi motora [2].



Slika 10. Frekventno-naponski odziv sonde aksijalnog rasutog fluksa; date su bočne frekvencije (sideband) oko frekvencije napajanja (49,29 Hz i 50,71 Hz); magnitude napona date su u decibelima.

Frekvencija klizanja  $f_k$  od 0,36 Hz, kao prva leva izražena komponenta u niskofrekventnom delu spektra prikazana je na slici 11. Ostale komponente nadesno su neparni harmonici ove frekvencije.

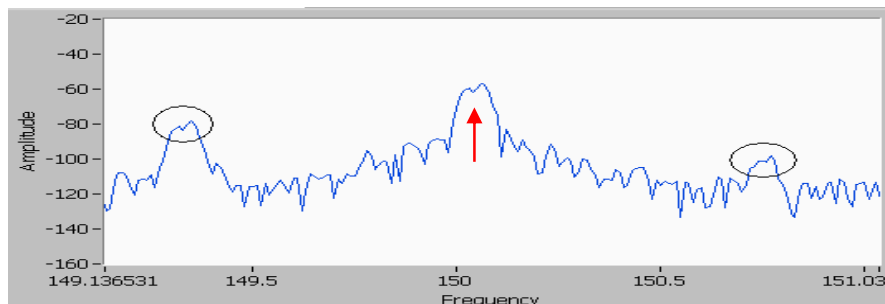


Slika 11. Frekventno naponski odziv sonde aksijalnog rasutog fluksa; frekventni opseg u oblasti frekvencije klizanja sa neparnim harmonicima; magnitude napona date su u decibelima.

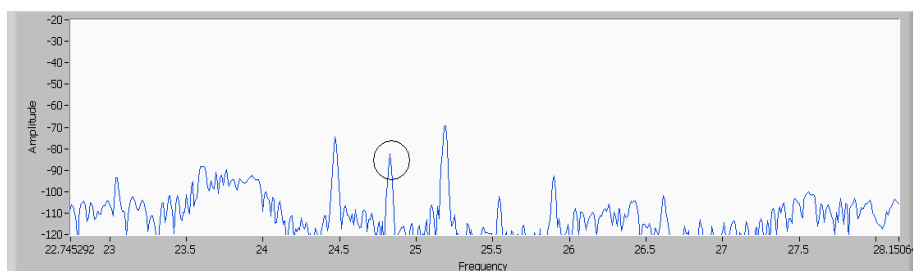
Treći harmonik frekvencije napajanja često je okružen sa više frekvencijskih komponenti kao što se može videti na slici 12. Treći harmonik ima učestanost 150,05 Hz, a bočne učestanosti su 149,3 Hz i 150,7 Hz. Slična je raspodela amplituda kao oko učestanosti napajanja, slika 9. Najverovatnije ove bočne učestanosti potiču od struja rotorskih šipki.

Određivanje rotacione frekvencije  $f_r$  u spektru je od velikog značaja za spektralnu analizu i dijagnostiku. Prema jednačini (5) možemo je izraziti kao:

$$f_r = \frac{f_s - sf_s}{p} \quad (7)$$



Slika 12. Frekventno-naponski odziv sonde aksijalnog rasutog fluksa; frekventni opseg u oblasti frekvencija trećeg harmonika napajanja (strelica) i bočne frekvencije (kružići); magnitude napona date su u decibelima.



Slika 13. Signal u frekvencijskoj domeni dobijen za motor 791729 B6. Kružićem je označena frekvencija  $f_r$ . Magnitude napona date su u decibelima.

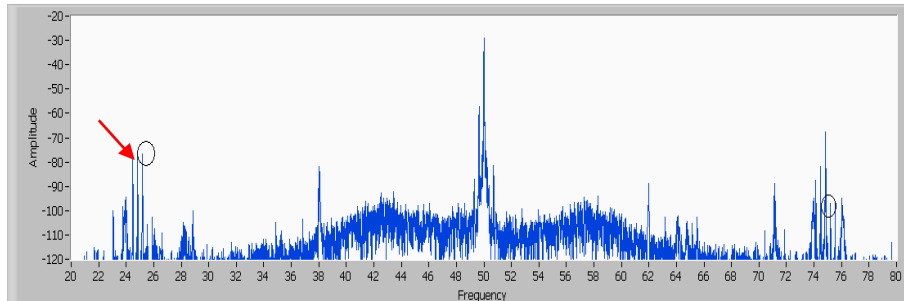
Prema slici 11. Određena je frekvencija  $sf_s$  od 0.36 Hz. Na osnovu (7) dolazi se do vrednosti rotacione frekvencije  $f_r = 24,83\text{Hz}$  koja se može detektovati u spektru, slika 13.

Treba napomenuti da je vrednost frekvencije  $sf_s$  jako teško proceniti pri malom opterećenju.

Moguća je provera dobijene vrednosti za  $f_r$  pomoću frekvencije ekscentriciteta  $f_{ec}$  čiji se harmonici mogu izraziti formulom

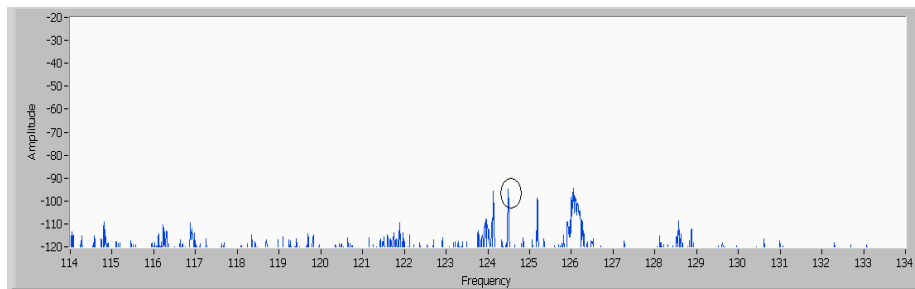
$$f_{ec} = f_s \pm f_r \quad (8)$$

Komponenta  $f_s + f_r$  je prva najizraženija sa desne strane  $f_s$  od koje je za isti iznos udaljena i komponenta  $f_s - f_r$ . Prema slici 14. pozicije ovih komponenti su na 75,19 Hz odnosno 25,18 Hz. Na osnovu njih, a prema (8) potvrđuje se ranije dobijena vrednost za  $f_r = 24,83\text{Hz}$ , označena strelicom na slici 14.



Slika 14. Određivanje komponenti ekscentričnosti  $f_s + f_r$  i  $f_s - f_r$  (kružići) i rotacione frekvencije  $f_r$  (strelica). Magnitude napona date su u decibelima.

Za određenu dijagnostiku od interesa je da se u spektru odredi komponenta  $f_s + 3f_r$ , koja je u našem slučaju 124,5 Hz, slika 15.



Slika 15. Signal u frekvencijskom domenu dobijen za motor 791729 B6. Kružićem je označena frekvencija  $f_s + 3f_r$ . Magnitude napona date su u decibelima.

#### 4. Elementi dijagnostike stanja motora na osnovu FSA

Lako se može pokazati da indukovano magnetno polje rotira sinhronom brzinom, zbog toga što je nastalo kao reakcija na rotaciju magnetnog polja statora. Narušavanje magnetne simetrije motora, iz bilo kog razloga, dovodi do odstupanja u simetriji indukovanih struja rotora odnosno komponenti struja statora. Nesimetrija se najlakše otkriva spektralnom analizom struja ili rasutih flukseva. U opštem slučaju pojaviće se bočne učestanosti  $f_{mk}$  u odnosu na  $f_s$  (osnovnu učestanost napajanja) koje su funkcija više parametara:

$$f_{mk} = f(f_s, s, p, m, n, k \dots) \quad (9)$$

gde su:  $s$ - klizanje,  $p$ -broj pari polova,  $m, n, k \in N$  su koeficijenti prebrajanja harmonika spektra odziva.

### a. Otkrivanje prekinutih rotorskih šipki

U slučaju kada dođe do loma šipke kaveza rotora simetrija je narušena i odziv takvog rotora će dovesti do promene indukovanih komponenti struja u statoru. To se matematički manifestuje pojavom niza bočnih harmonika struja statora nižih učestanosti ali i harmonika viših učestanosti. Harmonici ( $k$ ) bočnih učestanosti  $f_{Bk}$  (*sideband*) se mogu izraziti preko klizanja  $s$  i osnovne učestanosti  $f_s$  [1,3]:

$$f_{Bk} = f_s(1 \pm 2ks); k \in N \quad (10)$$

U nekim slučajevima je pogodnija formula koja uključuje veći broj harmonika [4,5]:

$$f_{Bk} = f_s \left[ \frac{k}{p}(1 - 2s) \pm s \right]; k \in N \quad (11)$$

Struja koja ima bočnu učestanost je tipično 100-1000 puta manja od rezultantne struje, odnosno glavne struje motora, a neke preporuke upućuju na zaključak da u motoru postoje prekinuti rotorski štapovi ako se registruje struja koja ima bočnu učestanost (pomerenu za oko 1 Hz od osnovne učestanosti) veća od 0,5% od struje osnovne učestanosti.

### b. Otkrivanje nejednakosti međugvožđa pomoću MCSA

Nejednakost međugvožđa postoji kod svakog motora a njena maksimalna vrednost je propisana od strane proizvođača. Ona se obično definiše kao procenat ( $e$  %) radijalne dužine međugvožđa ( $g$ ). Nejednakost međugvožđa, odnosno minimalna radijalna dužina međugvožđa, postoji uvek na jednom mestu bez obzira na vrtnju rotora i zato se naziva statička nejednakost međugvožđa ( $e_s$ ). Postoji i dinamička nejednakost ( $e_d$ ), koja je praktično nesimetrija tela rotora ili pomeranja ose rotora tokom rada motora. Praktično, maksimalna vrednost nejednakosti međugvožđa koju propisuje proizvođač ( $e\%$ ), podrazumeva ukupnu nejednakost međugvožđa, odnosno i statičku i dinamičku, za trofazne indukcionne motore je reda 5%. Fizička nesimetrija uzrokuje magnetnu nesimetriju što prouzrokuje silu magnetnog privlačenja na rotoru (*Unbalanced Magnetic Pull* - UMP) koja teži da smanji najmanju radijalnu dužinu međugvožđa.

Učestanosti  $f_{ec}$  komponenta struja odnosno njihovih rasutih flukseva koji se pojavljuju zbog nejednakosti međugvožđa date su izrazom [3,6]:

$$f_{ec} = f_s [1 \pm m(1-s)p]; m \in N \quad (12)$$

gde su  $f_s$  - učestanost napajanja (Hz),  $s$  - klizanje,  $p$  - broj pari polova. Dublja analiza ovih harmonika mogla bi da pokaže da oni zavise od broja žlebova statora i rotora motora, od statičke i dinamičke nesimetrije međugvožđa itd.

**c. Otkrivanje prekinutih rotorskih krajnjih kratkospojnih prstenova pomoću FSA**

Ovaj kvar se može ustanoviti na osnovu vrednosti komponente struje čija je učestanost [3,7]:

$$f_{BRR} = sf_s \quad (13)$$

gde su  $s$  -klizanje rotora,  $f_s$  -učestanost napajanja. Međutim, promena komponente rasutog fluksa, koja ima ovu učestanost, može da ukaže i na postojanje sasvim drugog kvara u trofaznom asinhronom motoru.

**d. Otkrivanje nesimetrije napona napajanja pomoću FSA**

Nesimetrija napona može prouzrokovati pregrevanje trofaznog motora. Čak i mala asimetrija u naponu napajanja izaziva značajne promene u ponašanju motora, izazivajući veće promene statorske struje a može dovesti i do prevremene degradacije statorskog namotaja. Standard NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*) preporučuje maksimalnu nesimetriju do 1%, pri čemu se smatra da neće doći do degradacije motora. U slučaju naponske nesimetrije reda 5%, snaga motora mora biti ograničena do 75%, a za veću naponsku nesimetriju preporuka je da se motor isključi.

Najdrastičnija nesimetrija napona nastaje u slučaju kada dođe do nestanka ili prekida jedne faze u napajanju trofaznog asinhronog motora, kada je trofazni motor praktično u režimu rada na jednoj fazi. Sa stanovišta monitoringa nesimetrije napona napajanja pomoću metode FSA, nije lako doneti odluku da li je do kvara došlo zbog greške u sistemu napajanja, sa koga se motor napaja, ili greške u motoru. Međutim, u kombinaciji sa merenjima na strani napajanja i monitoringom pomoću senzora fluksa, moguće je detektovati nesimetriju napona napajanja u motoru. U literaturi je moguće naći više izraza za bočne učestanosti, koje su relevantne za utvrđivanje nesimetrije napona. Promene amplituda komponenata rasutog fluksa, čije su učestanosti jednake bočnim učestanostima, mogu ukazati na postojanje nesimetrije napona. Ove bočne učestanosti  $f_{1a}$  su date izrazom:

$$f_{1a} = f_s \pm k(1-s)f_s; \quad (14)$$

gde su:  $f_s$  - učestanost napajanja,  $s$ -klizanje,  $k=1, 3, 5 \dots$

S obzirom da postoji veliki broj bočnih učestanosti relevantnih za utvrđivanje nesimetrije napona dovoljno je izdvojiti samo komponente rasutog fluksa, čije su učestanosti:

$$f_{1a} = f_s(2-s); k = 1, \quad (15)$$

$$f_{1a} = f_s(6-5s); k = 5, \quad (16)$$

### e. Otkrivanje kratkospojenih navojaka u namotaju statora

Kvarovi u namotaju statora motora generalno mogu biti: međunavojni kratak spoj namotaja faze, međufazni kratak spoj, zemljospoj navojka odnosno namotaja, prekid faze i drugi.

Otkrivanje kratkospojenih navojaka u namotaju statora je vrlo kompleksno. Kao prvo, komponente struje statora čije su učestanosti jednake bočnim učestanostima koje su relevantne za utvrđivanje postojanja kratkospojenih navojaka postoje i u ispravnim motorima. Da bi se doneo validan zaključak neophodno je posedovati referentne snimke datog motora u ispravnom stanju. Harmonike struja i fluksa statora  $f_{kz}$  koji su povezani sa ovom vrstom kvara možemo izraziti kao:

$$f_{kz} = f_s \left[ \frac{n}{p}(1-s) \pm k \right]; n, k \in N \quad (17)$$

gde su:  $f_s$  - osnovna učestanost napajanja,  $s$  - klizanje,  $p$  - broj pari polova,  $n$  i  $k$  su koeficijenti prebrajanja harmonika.

### f. Promena frekvencijskih komponenti na niskim i visokim frekvencijama

Niske učestanosti reda 1 Hz potiču od glavnih polja statora i rotora, frekvencije napajanja ( $f_s$ ) i rotacione frekvencije ( $f_r$ ). Relativo visoke učestanosti od više stotina herza potiču od žlebova statora i rotora i nekih kvarova. Za dijagnostiku stanja motora od većeg značaja su niske učestanosti, mada u nekim slučajevima su presudne visoke učestanosti.

Niske frekvencije  $f_{SWF}$  za detektovanje kratkospojenih navojaka pomoću aksijalnog fluksa se mogu napisati:

$$f_{SWF} = kf_s - nf_r \quad (18)$$

pri čemu je  $n$  prirodni broj a  $k$  red harmonika frekvencije napajanja.

Kada se opterećenje motora povećava, razlike između određenih harmonika od interesa (za motore sa i bez kratkospojenih navojaka) se značajno menjaju.

U literaturi se može naći podatak da su najosetljivije frekvencije, kada je u pitanju detektovanje kratkospojenih navojaka sledeće:  $f_s - f_r$ ,  $f_s + 5f_r$ , a kao izrazito najostljivija frekvencijska komponenta je  $f_s + 3f_r$ .

Ustanovljeno je da i frekvencijska komponenta na učestanosti  $f_s - f_r$  može biti značajno veća kod motora sa kratkospojenim navojcima. Međutim treba imati u vidu da je ista frekvencija prisutna i prilikom nekih drugih kvarova (npr. prekinute šipke rotora) kao i u radu motora bez kvarova.

Za detektovanje prekinutih rotorskih šipki preporučuju se frekvencijske komponente sa učestanošću  $f_s - 2sf_s$ . Data komponenta nema bitniju ulogu prilikom nastanka drugih kvarova u motoru. Preporučljivo je da se pored

magnetnog monitoringa u ovom slučaju koristi i spektralna analiza struje (CSA).

Za detektovanje *prekinutih krajnjih prstenova* rotora najosetljivija je frekencijska komponenta na učestanosti  $sf_s$ . Ista komponenta se pojavljuje i prilikom asimetrije napona napajanja. Zaključak je da se ova frekvencija može koristiti prilikom magnetnog monitoringa motora ali se i mogućnost drugih kvarova mora uzeti u obzir. Preporučljivo je verifikovati kvar i pomoću spektralne analize statorske struje (CSA).

Najosetljivija frekencijska komponenta koju je preporučljivo koristiti prilikom detektovanja *asimetrije napona napajanja* je na učestanosti  $6f_s - 5sf_s$ , ali se mora uzeti u obzir da je data komponenta takođe i posledica rotorske struje ispravnih motora pri normalnom radu. Takođe se može koristiti komponenta na frekvenciji  $2f_s - sf_s$ , ali kako je ona prisutna i tokom nastanka prekinutih rotorskih šipki i ovaj mogući kvar se mora uzeti u obzir.

## 5. Zaključak

U INT je razvijen uređaj za magnetni monitoring stanja asinhronih motora sa kaveznom rotorom, oznake MM6212. Zasniva se na merenju aksijalnog magnetnog fluksa i obradi signala i podataka na PC, odnosno laptopu. Različiti kvarovi na motoru dovode do specifičnih varijacija u frekencijskoj raspodeli fluksa pa možemo zaključiti da je spektralna analiza pogodna za monitoring stanja motora. Tako je moguće otkriti neke značajne kvarove kao što su prekinute rotorske šipke, prekinute krajnje prstenove rotora, nesimetriju napona napajanja, kratko spojene navojke u namotaju statora i dr.

Da bi sistem magnetnog monitoringa bio funkcionalan mora biti adekvatan uslovima merenja i potrebnoj obradi signala. Algoritmi za obradu signala i otkrivanje karakterističnih frekvencija moraju biti pouzdani tako što se koristi više različitih pristupa i provera dobijenih rezultata (na različitim frekventnim područjima, različiti harmonici, različite bočne učestanosti idr.). Tako su optimizovani algoritmi za otkrivanje prekinutih rotorskih šipki, otkrivanje nejednakosti međugvožđa, otkrivanje prekinutih rotorskih krajnjih kratkospojnih prstenova, otkrivanje nesimetrije napona napajanja, otkrivanje kratkospojnih navojaka u namotaju statora.

## Literatura

- [1]. N. Kartalović, B. Babić, Lj. Nikolić, Đ. Jovanović, A. Milošević, „Magnetni monitoring obrtnih električnih mašina u elektranama Elektroprivrede Srbije, II faza“, JP Elektroprivreda Srbije, Beograd 2011.
- [2]. N. Srb, *Magnetski monitoring električnih rotacijskih strojeva*, 2004., Zagreb
- [3]. V. Kokko, „Condition monitoring of squirrel-cage motors by axial magnetic flux measurements“, *Academic Dissertation*, Faculty of Technology, University of Oulu, Finska 2003.

- [4]. I. Rodriguez, R. Alves, V. Guzman, "Analysis of Air Gap Flux to Detect Induction Motor Faults", *UPEC 2006, 41th International Universities Power Engineering Conference*, 6<sup>th</sup>-8<sup>th</sup> septembre 2006
- [5]. R. Supangat, "On-line Condition Monitoring and Detection of Stator and Rotor Faults in Induction Motors", PHD thesis, The University of Adelaide, Australija 2008.
- [6]. J.Siau, A.Graff, W.Soong, N.Ertugrul, "Broken bar detection in induction motors using current and flux spectral analysis", *AUPEC 2003*
- [7]. M. Fenger, B. A. Lloyd, "CSA for Motor Rotor Fault Detection", *Iris Power Engineering*, Winter 2001.

**Abstract.** This paper suggests the possibility of diagnosing different types of failure in working induction motors using a device for spectral analysis of axial leakage flux, which has been developed by the Electrotechnical Institute Nikola Tesla. A search coil, which can be of different diameters, was mounted concentrically on the shaft at the rear of the motor. The electromotive force (emf) on each of the coils, created as a result of weak magnetic field changes, has a low amplitude. Following the necessary amplifications and adjustments, the signal is digitised on acquisition. In the fast Fourier transform (FFT) stage, the sampled and quantised digital time-based signal is converted to a frequency spectrum. Changes in spectral content are used to identify developing faults.

**Keywords:** magnetic monitoring, high voltage motor, spectral analysis

## **System for magnetic monitoring of high voltage motors MM6212**