

## Napredna dijagnostika ekscentriciteta i loma kaveza visokonaponskih asinhronih motora

Žarko Janda<sup>1</sup>, Marko Janković<sup>1</sup>, Mladen Milošević<sup>1</sup>, Blagota Jovanović<sup>1</sup>

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

**Kratak sadržaj:** U radu je prikazana uporedna dijagnostika dva visokonaponska asinhrona motora pomoću analize spektra struje statora – motor current signature analysis (MCSA) i analize rasutog aksijalnog magnetskog fluksa. Sva prikazana ispitivanja su izvršena pri delimično opterećenim motorima i to na jednom neispravnom i jednom ispravnom motoru 6 kV 3,15 MW, koji su instalirani u jednoj termoelektrani - toplani. Prikazana je pouzdana detekcija loma šipki kaveza i postojanje statičkog ekscentriciteta. Takođe je prikazan nov metod koji omogućava detektovanje kombinovanog kvara, gde istovremeno postoji i statički ekscentricitet i lom kaveza rotora. Novi metod detektovanja se bazira na analizi spektra aksijalnog rasipnog fluksa, i to u okolini dvostruke sinhrone frekvencije. Analiza kvara motora po vađenju rotora je potvrdila postojanje tri oštećene šipke rotora.

**Ključne reči:** asinhroni motor, dijagnostika, šipka rotora, statički ekscentricitet, spektar struje motora, spektar rasipnog fluksa

### 1. Uvod

Kod elektromotornih pogona je veoma važna brza i sigurna identifikacija početka nastajanja kvara. Pomoću adekvatnih procedura detekcije, kvar se može detektovati još u fazi nastajanja tako da se može preduzeti odgovarajuća korektivna akcija pre nego što dođe do značajnog oštećenja. To je naročito važno kod elektromotornih pogona gde je visok zahtev sigurnosti i pouzdanosti, bilo zbog visoke cene izgubljenih radnih sati (elektromotorni pogoni cirkulacionih pumpi, ventilatora svežeg vazduha i ventilatora dimnih gasova u termoelektrani, motori mlinova za ugaj, pogoni tračnih transporterata, itd ...) ili sigurnosti (rashladne kolone u hemijskoj industriji, pogoni u eksplozivnoj atmosferi, itd...). Uprkos poslovičnoj robusnosti kaveznih motora, koja proističe iz njegove jednostavne i pouzdane konstrukcije, ipak se u

kaveznom motoru, tokom životnog veka dešavaju i specifični kvarovi. Naročito su karakteristični lomovi šipki kaveza rotora i spojnih prstenova [1], kao i stradanja ležajeva i kvarova vezanih za statički i dinamički ekscentricitet rotora. Direktnan razlog loma šipki kaveza rotora je teško izolovati, i izgleda da se osnovni uzrok kvara menja od slučaja do slučaja. Međutim, verovatno da česti startovi motora i preopterećenja, termička naprezanja i štedljivi dizajn kaveza uz nedovoljan kvalitet izrade dovode do ovog tipa kvara kaveza. Takođe, izgleda da kod motora najvećih snaga, sa kliznim ležajevima koji nisu deo kućišta motora, do problema ove vrste može doći ako se pri montaži greškom napravi suviše veliki statički ekcentricitet rotora (u odnosu na osu statora).

Metod analize spektra struje statora – motor current signature analysis MCSA je dobro razrađena tehnika detekcije kvara kaveza rotora i oslanja se na upotrebu brze Furijeove transformacije (FFT) radi identifikacije i evaluacije veličine subharmonika u spektru snimljene struje statora, koji su direktno povezani sa oštećenjem kaveza rotora. Ti subharmonici se nalaze na frekvencijama određenim izrazom  $f_s(1 \pm 2ks)$ , gde je  $k$  prirodan broj,  $s$  je klizanje rotora i  $f_s$  je frekvencija napojnog napona. Prednosti metode su prosta instalacija opreme (koriste se samo strujni senzori) i relativna nezavisnost od parametara motora. Zahvaljujući tome, metod MCSA se koristi kao standardni pristup u industrijskom okruženju. Jedini zahtev koji se postavlja pred motor koji je predmet ispitivanja, jeste da postoji odgovarajući nivo opterećenja. U idealnom slučaju motor treba da bude približno nominalno opterećen sa teretom koji nema oscilacije otpornog momenta, ali je u praksi to često teško postići i ispitivanja se vrše pri parcijalno opterećenom motoru. Taj problem je u prikazanom istraživanju rešen tako što su uporedo provedena ispitivanja na neoštećenom i oštećenom motoru, u približno istim radnim stanjima.

U ovom radu su analizirana dva motora istog tipa, koji služe za cirkulaciju vode kroz kotao u jednoj termoelektrani-toplani. Oba motora pogone preko VOITH regulacione hidrauličke spojnice pumpu visokog pritiska. Pri tome na jednom motoru postoji povišeni nivo mehaničkih vibracija koje se prigušuju i pojačavaju u ritmu klizanja rotora i vidi se određeno igranje kazalje ampermetra u sekundarnom kolu strujnog transformatora, dok je drugi motor pri identičnim uslovima opterećenja mnogo "mirniji". Pošto je to bila jedinstvena prilika da se uporede dva motora iste konstrukcije, osim metoda MCSA korišćena je i analiza spektra rasutog fluksa, odnosno signala napona koji je dobijen induktivnim senzorom. Metod analize spektra rasutog fluksa je lokalni metod, koji se može primeniti u fizičkoj blizini motora, a u prikazanoj analizi je upotrebljen samo deo mogućnosti metode [2],[3].

## 2. Princip primenjenog ispitivanja

Snimanje radne struje statora motora kao i rasipnog fluksa pod teretom je obavljeno sa sledećom opremom:

- Digitalni memorijski osciloskop TDS 2014B, proizvodnje Tektronix,
- Strujna klešta i1000s, proizvodnje FLUKE,
- Strujna klešta i200s, proizvodnje FLUKE,
- Akvizicioni sistem USB NI6009, proizvodnje National Instruments,
- Notebook računar, Lenovo 3000 N200
- industrijski mikrofoni sa pojačalom "Simpson",
- ksenonski stroboskop za merenje klizanja
- induktivna sonda za merenje rasipnog fluksa, INT

Prenosni odnos strujnih mernih transformatora je 80A/5A i korišćena su zaštitna jezgra, a prenosni odnos naponskih mernih transformatora je 6kV/0,1 kV linijski.

Predmet ispitivanja su motori napojne pumpe br. 2 i napojne pumpe br. 4. u objektu termoelektrane-toplane. Na osnovu uočenih vibracija, kako mehaničkih tako i u struji motora, postavljena je osnovana sumnja da postoji određeno oštećenje motora pumpe br. 4. Prednost u ovoj analizi predstavlja činjenica da je za merenja u istim radnim tačkama raspoloživ i motor pumpe br. 2 koji se korektno ponaša u pogonu, a istih je nazivnih parametara.

Osnovno dijagnostičko ispitivanje se bazira na analizi spektra struje statora pri delimičnom opterećenju motora, a ostale metode su iskorišćene za potvrdu rezultata dobijenih osnovnom dijagnostičkom metodom.

Posle generisanja dovoljno dugačkih snimaka struje sa frekvencijom odabiranja od 8kHz izračunava se amplitudski spektralni snimljenog signala pomoću FFT metoda. Pikovi zbog oštećenja rotora ili ležajeva treba da se nalaze na frekvencijama koje su u odnosu na sinhronu frekvenciju pomerene za

$$\Delta f = 2 \cdot s \cdot f_s \quad (1)$$

Takođe, ako je kavez oštećen, vidi se niz pikova na frekvencijama ispod 250 Hz, pomenih naniže za  $\Delta f$  kao i ispod 350 Hz. Predmetna analiza spektra struje statora se provodi pri opterećenom motoru. Poželjno je bude nominalno opterećen, ali pošto je ispitivanje rađeno na bazi poređenja ispravnog i sumnjivog motora, određeni zaključci se mogu dobiti i pri manjem teretu.

#### NAZIVNI PODACI ISPITIVANIH MOTORA

Dvokavezni asinhroni motor:

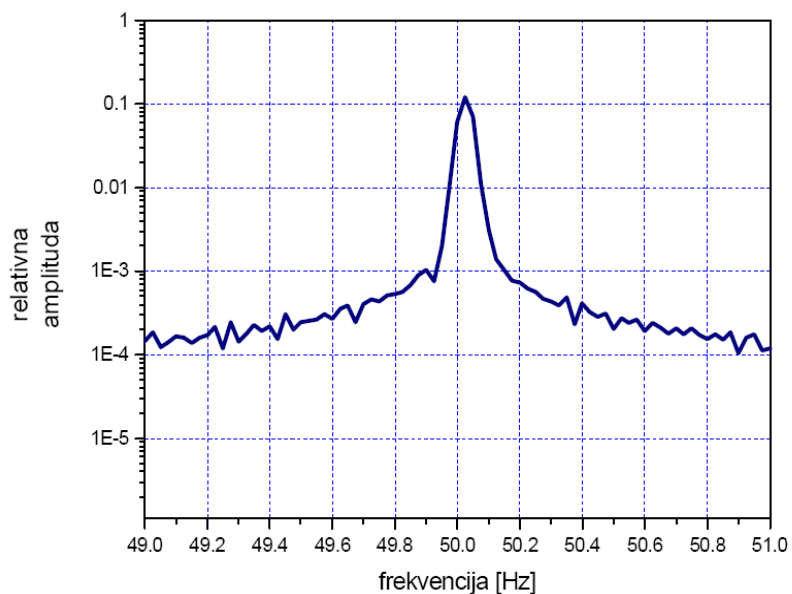
- nazivni napon	6 kV
- nazivna struja	365 A
- nazivna snaga	3,15 MW
- nazivna brzina	2 982 rpm
- $\cos(\varphi) = 0,92$	

Broj žlebova na rotoru je 56 a na statoru 60.

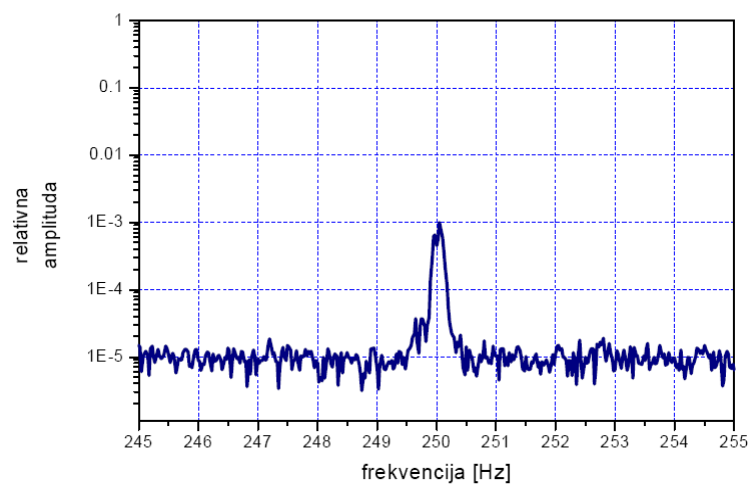
#### ANALIZA SPEKTRA STRUJE MOTORA

1) *Motor pumpe br. 2 (motor bez oštećenja)*

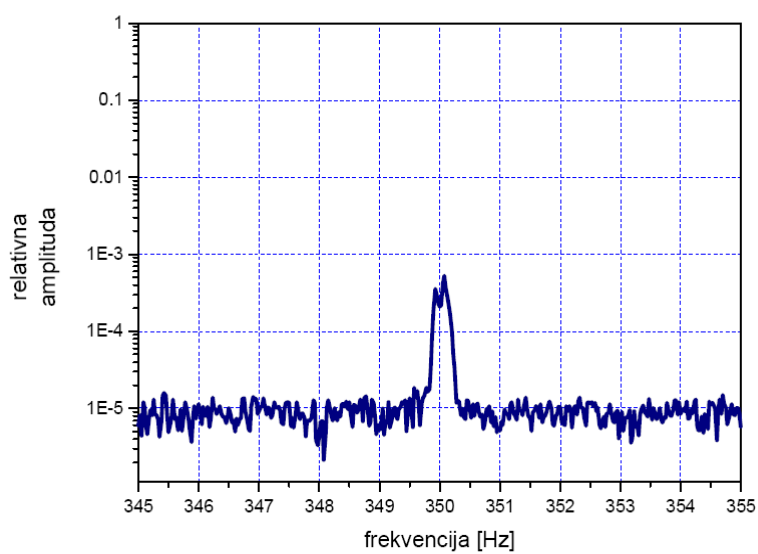
Snimanje je izvršeno pri protoku od 110 t/h, pritisku pumpe VP od 117 bara, otvoru aktuatora Voith-a od 45% i srednjoj brzini obrtanja pumpe VP od 4025 rpm. Efektivna vrednost struja statora se približno kretala u opsegu 155 ±160 A. Izmereno je srednje klizanje motora od 0,15789% što odgovara snazi na vratilu od 0,83 MW. Odgovarajući usrednjeni spektri struje statora, procesirani kroz Hanningov prozor, su prikazani na slikama 1, 2 i 3.



Slika 1. Okolina spektra struje oko fundamentalnog pika na 50 Hz



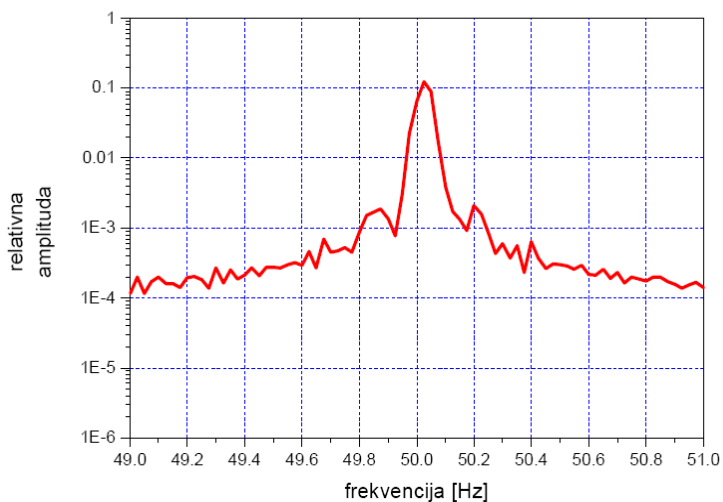
Slika 2. Okolina spektra struje ispod 250 Hz. Okolina spektra ispod 250 Hz je čista



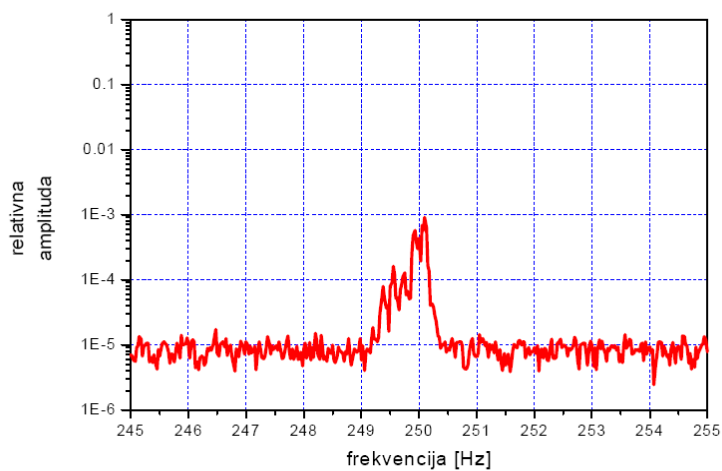
Slika 3. Okolina spektra struje ispod 350 Hz. Okolina spektra ispod 350 Hz je čista

2) *Motor pumpe br. 4 (motor sa oštećenjem)*

Snimanje je izvršeno pri protoku od 110 t/h, pritisku pumpe VP od 115 bara, otvoru aktuatora Voith-a od 57% i srednjoj brzini obrtanja pumpe VP od 4216÷4224 rpm.

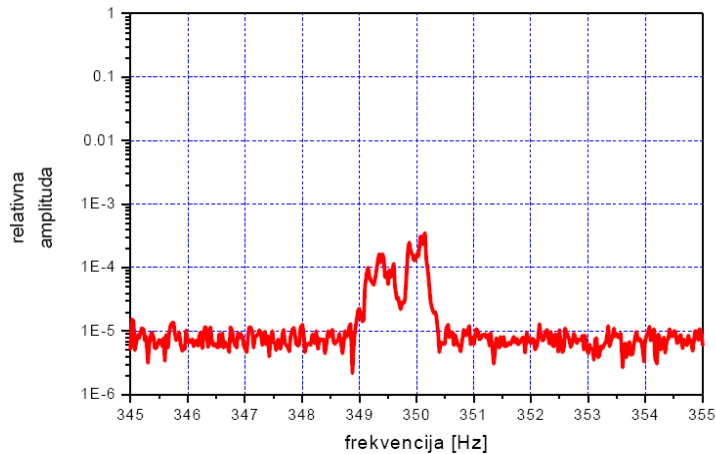


*Slika 4. Okolina spektra struje oko fundamentalnog pika na 50 Hz. Vidi se postojanje subharmonijskih bočnih pikova na frekvenciji dvostrukog klizanja*



*Slika 5. Okolina spektra struje ispod 250 Hz. Uočava se postojanje nekoliko pikova u spektru struje na frekvencijama  $5f_0 - 2s f_0$ ,  $5f_0 - 4s f_0$ ,  $5f_0 - 6s f_0$  i  $5f_0 - 8s f_0$*

Efektivna vrednost struja statora se približno kretala u opsegu  $175 \pm 180$  A. Izmereno je srednje klizanje motora od 0,18154% što odgovara snazi na vratilu od 0,95 MW. Odgovarajući usrednjeni spektri struje statora, procesirani kroz Hanningov prozor, su prikazani na slikama U 4, 5 i 6.



Slika 6. Okolina spektra struje ispod 350 Hz. Uočava se postojanje nekoliko pikova u spektru struje na frekvencijama  $7f_0 - 4s f_0$ ,  $7f_0 - 6s f_0$ ,  $7f_0 - 8s f_0$  i  $7f_0 - 10s f_0$

Na osnovu rezultata analize spektra struje statora predmetnih motora, pri delimičnom opterećenju, može se tvrditi da postoji oštećenje kaveza rotora motora pumpe br. 4. Intenzitet oštećenja se ne može dobro proceniti je je motor bio podopterećen, ali je egzistencija oštećenja sigurna.

### 3) Uporedna analiza sadržaja žlebnih harmonika rotora u struji statora

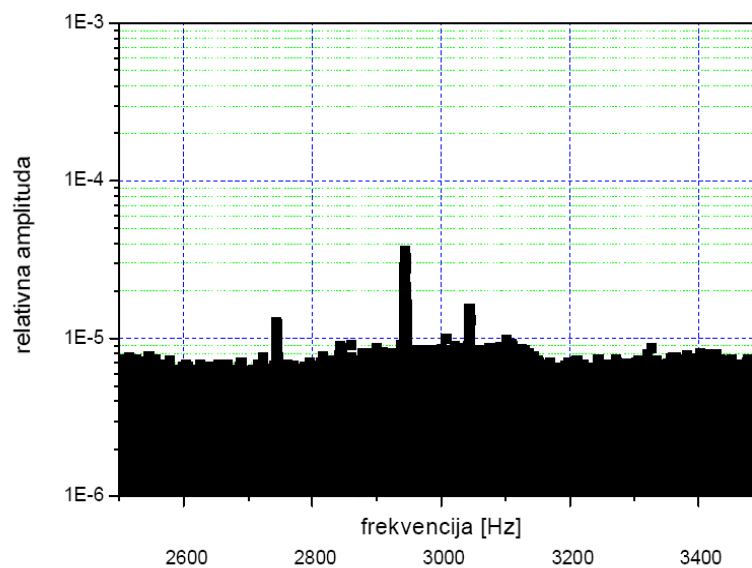
Žlebni harmonici rotora zbog postojanja statičkog ekscentriciteta se javljaju na frekvencijama definisanim formulom [4] (2)

$$f_{RSH} = \frac{f_s}{p} R(1-s) \pm n_w f_s, \quad (2)$$

gde je:  $f_s$  - frekvencija fundamentala, bliska 50 Hz,  
 $R$  - broj žlebova rotora, u ovom slučaju 56,  
 $p$  - broj pari polova, u ovom slučaju 1,  
 $s$  - klizanje, u ovom slučaju blisko 0,  
 $n_w$  - prirodan broj

Postojanje ovih harmonika je vezano za postojanje statičkog

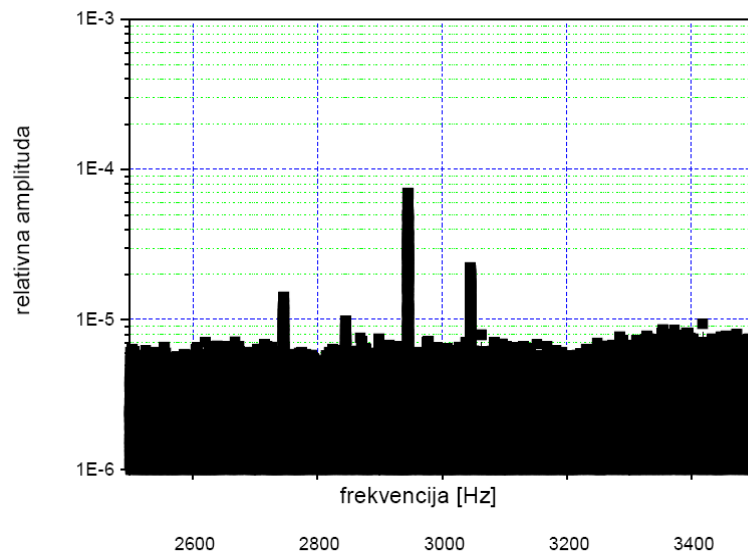
ekscentriciteta, a intenzitet zavisi od veličine predmetnog ekscentriciteta. Posmatrajući odgovarajuće delove spektra struje statora, koji su prikazani na slici 7 za motor pumpe br. 2 i na slici 8 za motor pumpe br. 4 može se sprovesti dalja dijagnostika.



Slika 7. Deo spektra struje statora motora pumpe br. 2 pri teretu od 0,76 MW. Vide se žlebni harmonici rotora na frekvenciji 2942 Hz, relativne amplitude  $3,84094908E-5$  i na frekvenciji 3045 Hz, relativne amplitude  $1,67036611E-5$

Na slikama 7 i 8 je očigledno da su amplitude žlebnih harmonika rotora veće kod motora pumpe br. 4 nego kod motora pumpe br. 2 pri približno istom teretu. Relativna amplituda na 2944 Hz je 1,9 puta veća a relativna amplituda na 3045 Hz je 1,38 puta veća, što navodi na zaključak da je statički ekscentricitet motora pumpe br. 4 veći nego statički ekscentricitet motora pumpe br. 2.

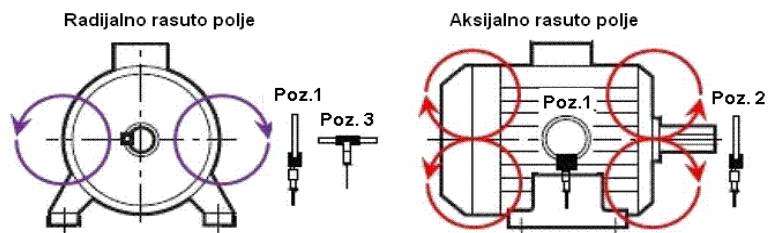




Slika 8. Deo spektra struje statora motora pumpe br. 4 pri teretu od 0,86 MW. Vide se žlebni harmonici rotora na frekvenciji 2944 Hz, relativne amplitude  $7,32354721E-5$  i na frekvenciji 3045 Hz, relativne amplitude  $2,30415161E-5$

### 3. Uporedna analiza rasutog aksijalnog fluksa motora

Rasuti magnetni fluks motora se može meriti pomoću induktivne sonde (kalibrisanog probnog kalema) koja može biti postavljena oko motora na pozicijama 1, 2 i 3, slika 9.



Slika 9. Pozicije induktivne sonde za merenje rasipnog magnetnog polja

Pretežno aksijalni rasuti fluks se meri kada se induktivna sonda nalazi na poziciji 2, a pretežno radijalni rasuti fluks se meri kada se sonda nalazi na poziciji 3 [2]. Kada se induktivni senzor nalazi na poziciji 1, tada on zahvata radijalno rasuto polje i deo aksijalnog rasutog polja. Idealno merenje rasutog aksijalnog polja sa senzorom na poziciji 2 se ne može uvek ostvariti u industrijskom okruženju. Naime, motor može biti tako spojen sa radnom mašinom ili reduktorom da mu se ne može prići na odgovarajući način. Upotreba induktivne sonde radi analize rasutor fluksa i dijagnostike stanja asinhronog motora su detaljno analizirani i u radu [3]. Kada u kaveznom motoru nema oštećenja rotora, odnosno ne postoji ekcentricitet, dominantna frekvencija indukovanog napona na induktivnoj sondi biće 50 Hz. Više harmonijske komponente u spektru indukovanog napona sonde će se pojaviti zbog prostorne periodičnosti rasporeda šipki rotora. Nesinusna distribucija magnetopobudne sile statora takođe dovodi do indukovanja viših harmonika.

Kada postoji više susednih prekinutih šipki kaveza, stvara se rotirajuća zona anomalno visokog polja koje rotira sa brzinom rotacije rotora motora. To polje pulsira sa frekvencijom klizanja i može se predstaviti kao superpozicija dva polja koja rotiraju u suprotnim smerovima, ugaonom brzinom klizanja ( $s$  puta sinhrona brzina) u odnosu na rotor. Ta dva rotirajuća polja brzo opadaju sa udaljavanjem od zone kvara na rotoru. Zato magnetno polje, pridruženo prekinutim šipkama kaveza, moduliše napon na indukcionoj sondi sa karakterističnom frekvencijom

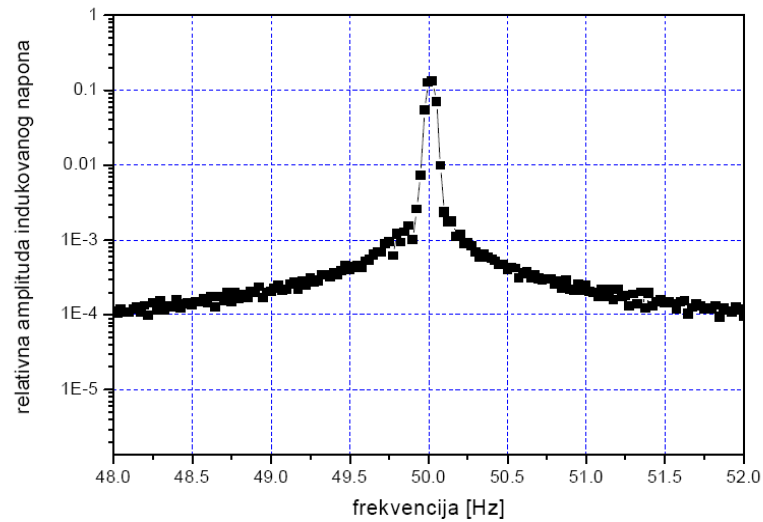
$$f_{FAULT} = \left( \frac{2f_s}{p} \right) (1-s) \pm s \cdot f_s, \quad (3)$$

gde je  $f_s$  frekvencija pobude,  $p$  broj polova motora i  $s$  klizanje.

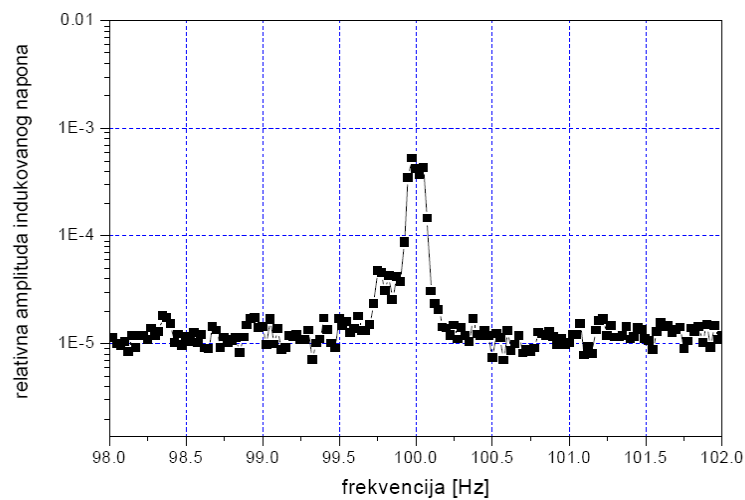
Međutim, posebna situacija se javlja kada istovremeno postoji lom šipke rotora i statički ekscentricitet (nepoklapanje osa statora i rotora). Zbog postojanja slomljene šipke kaveza rotora postoji [5] direktno i inverzno magnetno obrtno polje u odnosu na rotor, kao posledica pulsirajućeg polja vezanog za rotor, frekvencije  $f_s$ . Ali, za razliku od klasičnog slučaja [3], [5], zbog statičkog ekcentriciteta dolazi i do modulacije tog pulsirajućeg polja frekvencijom  $f_s(1-s)$ , zbog postojanja neravnomernosti vazdušnog zazora. Zbog te modulacije, sada se u odnosu na rotor javljaju nova obrtna polja, frekvencije  $f_s(1-2s)$ . Direktno obrtno polje koje odgovara toj frekvenciji se sabira, pri svođenju na nepokretni referentni sistem statora, sa mehaničkom frekvencijom obrtanja rotora motora,  $f_s(1-s)$  i kao rezultat se dobija, između ostalih, i obrtno polje frekvencije  $f_s(2-3s)$ , što se jasno vidi na slici 13, kao levi bočni pik u spektru indukovanog napona sonde, u odnosu na pik koji odgovara 100 Hz.

Uočavanjem postojanja opisanog pika u spektru rasutog magnetskog polja je moguće detektovati istovremeno postojanje statičkog ekcentriciteta i

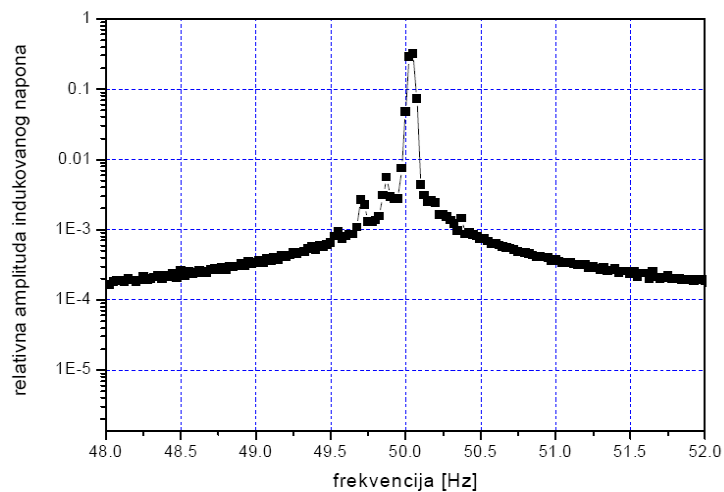
električne nesimetrije rotora. Takođe, primetno je da je veći rasipni 50 Hz-ni aksijalni fluks motora pumpe br. 4 nego motora pumpe br. 2.



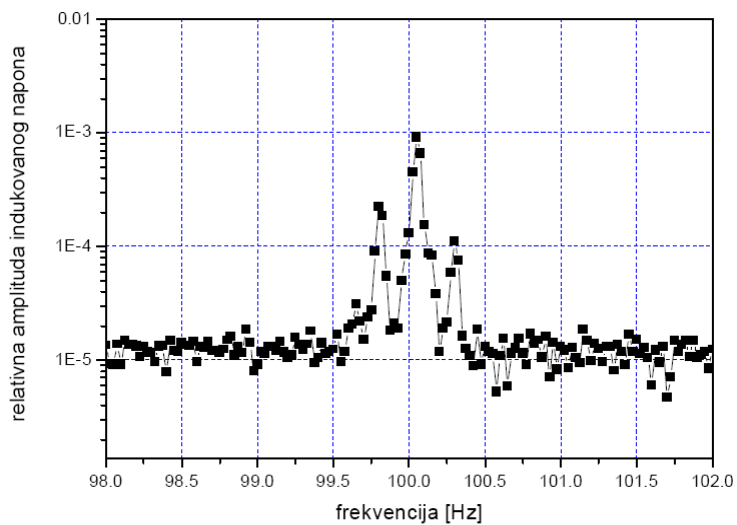
Slika 10. Spektar rasipnog aksijalnog fluksa motora pumpe br. 2, meren pri teretu od 0,76 MW. Korišćena induktivna sonda i prikazan je filtriran indukovani napon. Prikazana okolina 50 Hz



Slika 11. Spektar rasipnog aksijalnog fluksa motora pumpe br. 2, meren pri teretu od 0,76 MW. Korišćena induktivna sonda i prikazan je filtriran indukovani napon. Prikazana okolina 100 Hz



Slika 12. Spektar rasipnog aksijalnog fluksa motora pumpe br. 4, meren pri teretu od 0,86 MW. Korišćena induktivna sonda i prikazan je filtriran indukovani napon. Prikazana okolina 50 Hz



Slika 13. Spektar rasipnog aksijalnog fluksa motora pumpe br. 4, meren pri teretu od 0,86 MW. Korišćena induktivna sonda i prikazan je filtriran indukovani napon. Prikazana okolina 100 Hz

Na slikama 10 i 12 se uočava da je kod motora pumpe br. 4 pik indukovanih napona sonde zbog rasutog aksijalnog fluksa, na 50 Hz i pri

približno istom teretu, 2,3 puta veći nego kod motora pumpe br. 2. što je indicacija za postojanje statičkog ekscentriciteta [2].

Na slikama 11 i 13 se uočava da je kod motora pumpe br. 4 pik indukovanog napona sonde zbog rasutog aksijalnog fluksa, na 100 Hz i pri približno istom teretu, 1,85 puta veći nego kod motora pumpe br. 2. što je takođe indicacija za postojanje statičkog ekscentriciteta [2].

Takođe, na slici 13 postoje bočni pikovi u spektru rasutog aksijalnog fluksa oko dvostruke fundamentalne frekvencije (100 Hz), na rastojanju jednakom proizvodu trostrukog klizanja i sinhronne frekvencije koji se mogu povezati i sa ekscentricitetom rotora [6].

#### **4. Izbijanje vibracija**

Utvrđeno je merenjem da na kliznom ležaju prema reduktoru motora pumpe br. 4, pri opterećenju od 1,03 MW amplituda vibracija varira u opsegu od 2,5 mm/s do 5,5 mm/s pri čemu se promena dešava u ritmu klizanja rotora. Utvrđeno je da intenzitet ovih vibracija zavisi od opterećenja. Opisana pojava se takođe vezuje za oštećenje kaveza motora [7].

#### **5. Zaključak**

Primenom metode MCSA je pokazano da motor pumpe br. 4 poseduje statički ekscentricitet zbog nedovoljnog poklapanja osa statora i rotora motora. Takođe, postoji i oštećenje kaveza rotora. Prilikom otvaranja motora pumpe br. 4 konstatovano je da postoje tri slomljene šipke kaveza. Pošto se, u praksi, često ponavlja kvar na mestima gde je kavez hartletovan na licu mesta, to je odlučeno da se napravi potpuno nov kavez. Radna pretpostavka je da je inicijalni problem bio nedovoljno poklapanje osa statora i rotora pri montaži, što je izazvalo dalje brzo starenje kaveza rotora zbog povišenog nivoa vibracija. Moguće je da su predmetna oštećenja kao konsekvencu izazvala i određenu degradaciju kliznih ležajeva.

Prikazan je novi metod za detektovanje kombinovanog kvara kaveza rotora i postojanja statičkog ekscentriciteta putem spektralne analize rasutog aksijalnog fluksa u okolini dvostruke sinhronne frekvencije.

#### **Zahvalnica**

Rad je nastao u okviru projekta TR33020, „Povećanje energetske efikasnosti hidroelektrana i termoelektrana Elektroprivrede Srbije razvojem tehnologije i uređaja energetske elektronike za regulaciju i automatizaciju”,

koji je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

## Literatura

- [1] A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni and G. Capolino, "Advances in diagnostic techniques for induction machines," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 12, pp. 4109 - 4126, 2008.
- [2] A. Ceban, R. Pusca, R. Romary, "Study of Rotor Faults in Induction Motors Using External Magnetic Field Analysis", *IEEE trans. on Industrial Electronics*, Vol. 59, No. 5, May 2012. pp 2082 – 2093.
- [3] N. M. Elkasabgy, A. R. Eastham and G. E. Dawson, "Detection of Broken Bars in the Cage Rotor on an Induction Machine", *IEEE trans. on Industry Applications*, vol. 28, no. 1, January/February 1992. pp 165 - 171.
- [4] M. Benbouzid, "A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Fault Detection", *IEEE trans. on Industrial Electronics*, Vol. 47, No. 5, October 2000. pp 984 – 993.
- [5] G.B. Kliman, R.A. Koegl, J. Stein, R.D. Endicott, M.W. Madden, "Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, On page(s): 873 - 879, Volume: 3, Issue: 4, Dec. 1988.
- [6] B.A. Русов, *Спектральная вибродиагностика*, 1996, [www.vibrocenter.ru/book8.htm](http://www.vibrocenter.ru/book8.htm)
- [7] W. R. Finley, "Troubleshooting Induction Motors", [http://www.sea.siemens.com/us/SiteCollectionDocuments/WSSResources/Internet/Products/1\\_10/8/TroubleshootingInductionMotors.pdf](http://www.sea.siemens.com/us/SiteCollectionDocuments/WSSResources/Internet/Products/1_10/8/TroubleshootingInductionMotors.pdf)

**Abstract:** In the paper the comparative diagnostics of medium voltage induction motors has been presented. The methods employed are the motor current signature analysis (MCSA) and the axial leakage flux spectral analysis. All presented test procedures have been conducted on partially loaded motors, one without fault and the other with fault. Rated parameters of case study motors are 6 kV and 3.15 MW, and both motors are installed in one combined steam power plant. The reliable broken rotor bars detection and existence of static eccentricity have been demonstrated. The new method for combined fault detection has also been announced. The combined fault under scope is the simultaneous existence of broken rotor bars and static eccentricity. The proposed combined fault detection method is based upon axial leakage flux spectral analysis, especially in the vicinity of the double fundamental frequency. The existence of three broken rotor bars has been confirmed after physical rotor cage examination.

**Keywords:** Induction motor, Diagnostics, Rotor bar, Static eccentricity, Motor current spectrum, Leakage flux spectrum

## **The Advanced Eccentricity and Broken Cage Diagnostic Method for Medium Voltage Induction Motors**

