

## Magnetni monitoring generatora u elektranama EPS

Nenad Kartalović, Blagoje Babić

Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Koste Glavinića 8a,  
11000 Beograd, Srbija  
[nenad.kartalovic@ieent.org](mailto:nenad.kartalovic@ieent.org)  
[blagoje.babic@ieent.org](mailto:blagoje.babic@ieent.org)

**Kratak sadržaj:** Magnetni monitoring generatora je beskontaktna metoda praćenja određenih pojava kod generatora. Najčešće se primenjuju induktivni senzori koji detektuju pojave sa promenljivim magnetnim poljima. Moguće je praćenje kvaliteta generatorskog napona, praćenje rada pobude, praćenje rada magnetnih kola, određivanje kritičnih režima rada generatora. U radu je posebno razmatrano otkrivanje proboja između navojaka rotorskog namotaja ili proboja na masu kod hidro i turbo generatora. Obrađene su važne pojedinosti vezane za merno-akvizicioni sistem i odgovarajuće algoritme. Predstavljeni su neki rezultati merenja u elektranama EPS. Na kraju su date smernice za uvođenje magnetnog monitoringa u praksu EPS.

**Ključne reči:** magnetni monitoring, kratak spoj, navojci, generatori

### 1. Uvod

Savremeni uslovi eksploatacije generatora zahtevaju dobro poznavanje stanja mašine. Najpouzdanije informacije o tome se mogu dobiti stalnim praćenjem parametara mašine, monitoringom. U svetskoj i domaćoj praksi su razvijeni sistemi za permanentni nadzor stanja generatora [1]:

- monitoring vibracija
- monitoring temperatura
- monitoring osovinskih napona i struja
- monitoring parcijalnih pražnjenja
- magnetni monitoring

U praksi EPS se već uvodi monitoring parcijalnih pražnjenja, a za magnetni monitoring kao vrlo perspektivne merno-dijagnostičke tehnike predstoje napori u tom pravcu. Magnetni monitoring može da se koristi za:

- praćenje kvaliteta generatorskog napona: frekvencija, oblik, stabilnost, sadržaj viših harmonika, (ne)simetričnosti napona;
- praćenje rada pobude: pravilnosti rada tiristora, stanje komutacije, stanje kolektora itd.
- praćenje parametara rada generatora: remanentni magnetizam, (pre)zasićenost magnetskog kola u pojedinim režimima rada, optimizacija rada generatora, određivanje kritičnih režima rada;
- otkrivanje proboja namotaja rotora između navojaka ili na masu
- otkrivanje labavosti klinova utora
- otkrivanje vibracija glava namota itd.

Ono što magnetni monitoring posebno preporučuje kao perspektivnu mernu metodu je:

- jednostavnost primene i visoka ekonomičnost
- precizna i pouzdana dijagnostika
- primena na do sada ne korišćen način.

**Tabela 1.** Komparacija metoda za otkrivanje kratkospojenih navoja [2]

Metoda merenja	Lociranje kratkospojenog namotaja	Osetljivost merenja	Kvantitativno merenje	Detekcija uslovnog spoja*
<b><i>Merenja u toku rada mašine</i></b>				
Merenje impedanse rotora	Ne	Niska	Ne	Da
Udarnim naponom	Da	Visoka	Da	Ne
Merenje rasipnog fluksa	Da	Visoka	Ne	Ne
<b><i>Merenja kod mašine van pogona</i></b>				
Strujno/naponska metoda	Ne	Niska	Ne	Možda
<b><i>Magnetni monitoring</i></b>	<i>Da</i>	<i>Visoka</i>	<i>Da</i>	<i>Da</i>

Jednostavnost primene se ogleda u beskontaktnim merenjima svih pojava koje ostavljaju svoj „magnetni otisak“ u vrlo složenom rasutom magnetnom polju u prostorima u i oko mašine. Tehnički je izvodljiv kao *spoljašnji magnetni monitoring* (monitoring rasipnih magnetskih polja izvan

mašine) i *unutrašnji magnetni monitoring* (monitoring polja u rashladnim kanalima, polja u međugvožđu i polja u drugim prostorima u mašini).

Kako se radi o egzaktnim analitičkim zakonitostima pojava i polja to se pogodnim algoritmima mogu dobiti precizni i sigurni podaci odnosno odgovarajući rezultati dijagnostike.

Posebno je interesantna oblast u kojoj je magnetni monitoring primenljiv. Naime to je nova oblast magnetnog nadzora u kojoj klasični monitoring i zaštita generatora ne deluju.

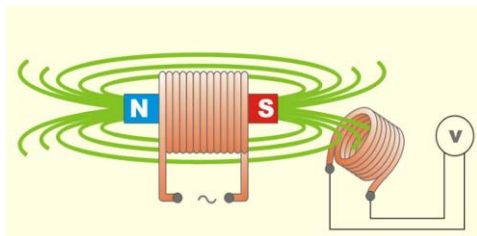
Stanje izolacije rotorskog namotaja je teško utvrditi za vreme tekućeg održavanja generatora jer je pristup namotaju ograničen bez skidanja rotorske kape i klinova. Ispitivanja tokom isključene mašine (off-line) za otkrivanje kratkospojenih navojaka i zemljospojeva (tabela 1) su često nepouzdana, zbog prirode kvara, koji se ponekad može manifestovati samo za vreme rada generatora kada deluju centrifugalne sile ili termička naprezanja. Pouzdanost metode magnetnog monitoringa je vrlo visoka.

Neke karakteristične vrednosti magnetne indukcije date su u tabeli 2 gde se vide vrednosti magnetne indukcije koje se mogu meriti kod generatora.

**Tabela 2.** Karakteristične vrednosti magnetne indukcije za generator [3]

	<b>Mesto merenja magnetnog fluksa (indukcije)</b>	<b>Magnetna indukcija</b>
1	indukcija u vazдушnom zazoru generatora (sinhr. mašina 50 Hz)	1000 mT
2	indukcija u rubnim regionima generatora	100 mT
3	indukcija izvan jezgra generatora	10 mT
4	indukcija na spoljašnjoj površini kućišta generatora	1 mT
5	indukcija izvan kućišta generatora (na udaljenosti od $\approx 1$ m)	100 $\mu$ T
6	maksimalno dozvoljena indukcija (50 Hz) u zoni za boravak osoblja na radnom mestu	500 $\mu$ T
7	maksimalno dozvoljena indukcija (50 Hz) u zoni za boravak ostalog osoblja	100 $\mu$ T
8	maksimalno dozvoljena indukcija (50 Hz) u zoni za duži boravak ljudi (minimum 2.5 dana po sedmici)	1 $\mu$ T
9	maksimalna indukcija za pejsmejkere (50 Hz)	15 $\mu$ T
	<b><i>magnetna indukcija na zemlji (statički)</i></b>	<b><i><math>\approx 50\mu</math>T</i></b>

Najpogodniji način merenja promenljive magnetne indukcije je induktivni, slika 1.



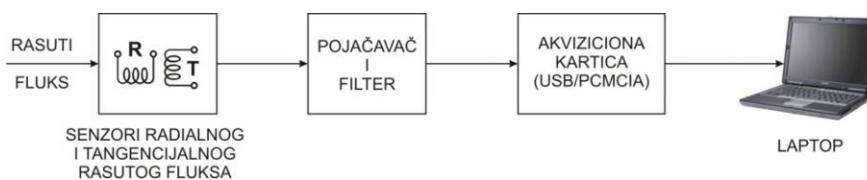
$$e = -N \frac{d\phi}{dt}$$

**Slika 1.** Način korišćenja induktivnog valjkastog kalema kao senzora za merenje magnetne indukcije [1]

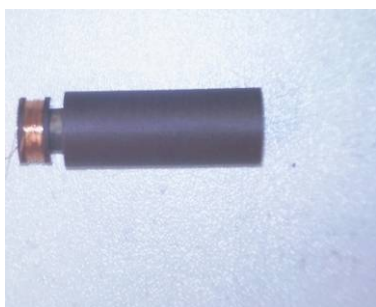
## 2. Projektovanje i izrada opreme za magnetni monitoring

Osnovni elementi sistema magnetnog monitoringa (slika 2.) su:

- senzor rasutog fluksa
- prilagodni elementi signala sa senzora (pojačavači, filtri ...)
- višekanalna/multifunkcionalna akviziciona kartica
- laptop sa operativnim sistemom
- osnovni programi za laptop (PC)
- programi za ekspertske analize rezultata



**Slika 2.** Blok dijagram sistema magnetnog monitoringa [4]



a)

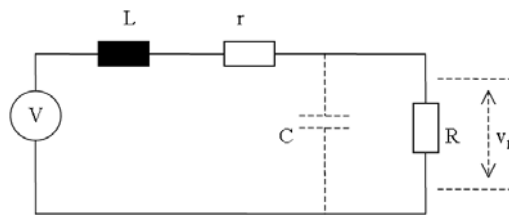


b)

**Slika 3.** Senzori promenljivog magnetnog polja razvijeni u Institutu; a) senzor za ugradnju u međugvožđe; b) senzori za merenje aksijalnog fluksa kod motora

*Senzor magnetnog fluksa* je vazдушna zavojnica u obliku kalema malog prečnika nekoliko mm ili cm, (slika 3a) koja se sastoji od nekoliko navojaka do nekoliko stotina navojaka bakarnog provodnika. Senzori se mogu ugraditi na dva načina: kroz ventilacioni kanal koji se nalazi u paketu limova statora ili na stator sa strane međugvožđa. Vrednost signala, koja se dobija na senzoru ugrađenom kroz ventilacioni kanal, je po pravilu za red veličine manja od vrednosti dobijene na senzoru postavljenom u međugvožđu.

Izrada vazdušnog kalema, iako tehnički jednostavna zahteva, izvesnu pažnju oko poznavanja njenih mogućnosti, pogotovu kada se želi koristiti na vrlo niskim ili vrlo visokim frekvencijama. Ekvivalentno kolo vazdušne zavojnice dato je na slici 4.



**Slika 4.** Ekvivalentno kolo vazdušne zavojnice [5]

Na slici 4.,  $V$  predstavlja indukovanu elektromotornu silu a  $V_p$  mereni napon,  $R$  mernu otpornost,  $r$  otpornost namotaja,  $L$  induktivnost namotaja i  $C$  parazitnu kapacitivnost sonde. Za datu frekvenciju,  $\omega = 2\pi f$ , ustanovljena je jednačina za slabljenja  $|A|$  kola (koja je odnos napona dobijenog merenjem  $V_p$  i napona idukovanog u zavojnici  $V$ ) [5]:

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

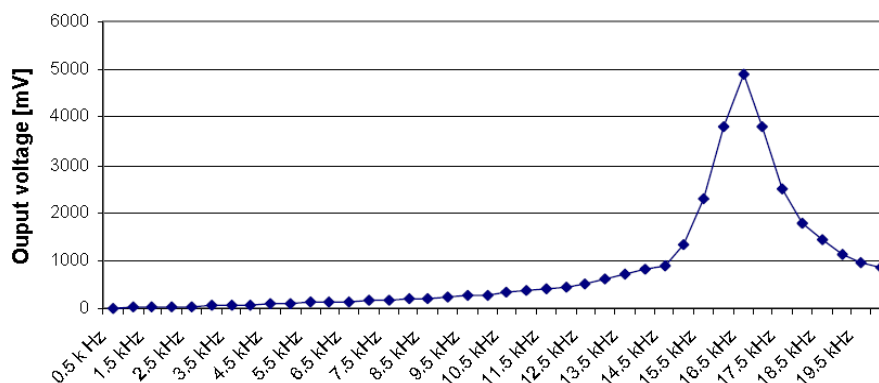
Pokazuje se da za više frekvencije  $\frac{R+r}{R} \ll \omega LC$ ,  $\frac{L}{R} \ll Cr$ , prethodna jednačina može biti svedena na:

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

Takođe, za niže frekvencije  $\frac{R+r}{R} \gg \omega LC$ ,  $\frac{L}{R} \gg Cr$ , prethodna jednačina može biti svedena na:

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

5. Amplitudno-frekventni odziv za jednu konkretnu zavojnicu dat je na slici



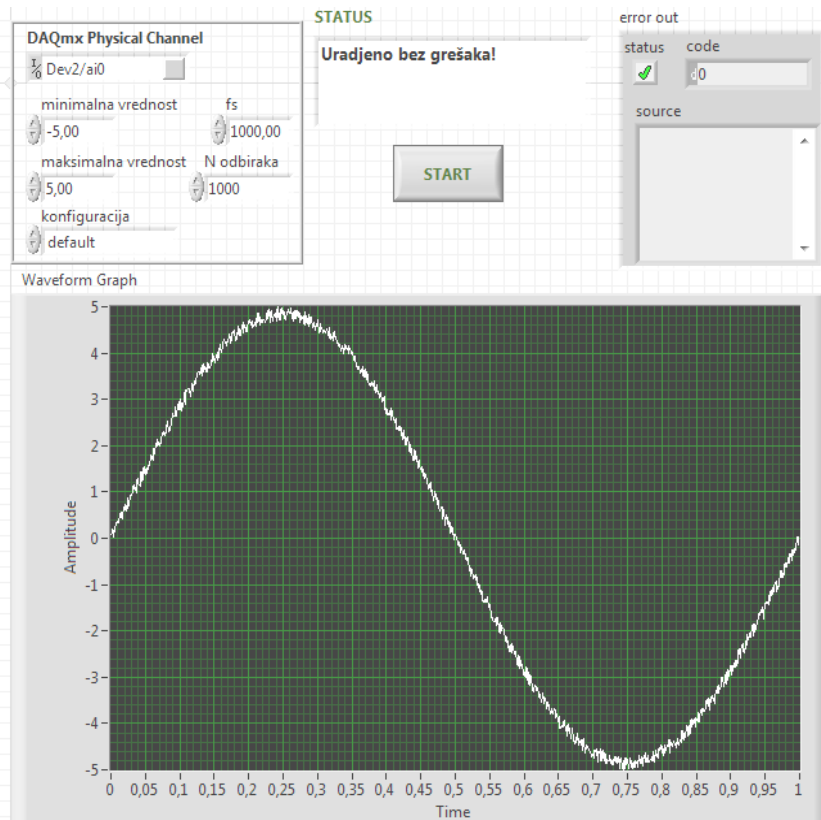
**Slika 5.** Izlazni napon senzora fluksa u opsegu od 0.5 kHz do 20 kHz [5]

Kao akvizicioni sistem korišćena je višekanalna multifunkcionalna elektronska kartica oznake NI USB-6212, M Series MIO DAQ, Bus-Powered. Kartica poseduje 16 analognih ulaznih kanala rezolucije 16 bita brzine odabiranja 400 kS/s, 2 analogna izlaza rezolucije 16 bita brzine odbiraka 250 kS/s i 32 digitalna (diskretna) ulazno/izlazna kanala. 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 je programabilan, ( $\pm 0.2$  do  $\pm 10V$ ) po kanalu. Raspolaže mogućnošću digitalnog trigerovanja akvizicije. Kao pomoćni alat poseduje dva brojača/tajmera.

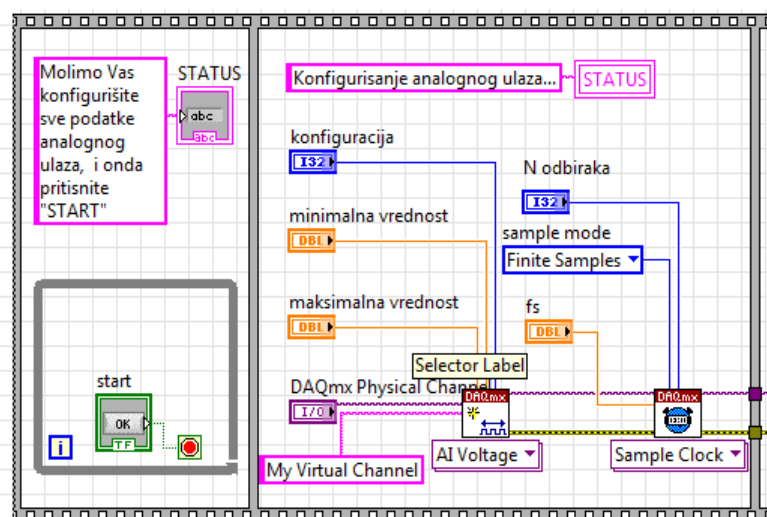
### 3. Algoritmi za merenja i obradu podataka

Kao osnovni softverski paket koristi se LabVIEW 9.0 koji omogućuje izradu potrebnih algoritama i kompatibilan je sa korišćenim hardverom. LabVIEW ima grafičko razvojno okruženje koje omogućava razvoj kompletne aplikacije uključujući akviziciju, analizu i prezentaciju podataka.

Osnovni razvojni blok LabVIEW aplikacije je virtuelni instrument. Idealan je za aplikacije koje zahtevaju determinističku kontrolu, praćenje i nadzora mašina. Sa preko 5.000 drajvera za razne instrumente i podrškom za standardne komunikacione interfejse, LabVIEW je vodeći softver u industriji po pitanju kontrole instrumenata. Funkcionalnost LabVIEW-a se proširuje sa dodatnim modulima i alatima kroz novi set virtuelnih instrumenata koji daju mogućnost povezivanja sa bazama podataka, naprednih mernih analiza, generisanje izveštaja, itd. Dodatni moduli nude veliko unapređenje sa moćnim alatima za napredne aplikacije, kao što su real-time operacije, FPGA programiranje, rad sa PDA uređajima.



Slika 6. Front panel algoritma za akviziciju podataka (merenja)



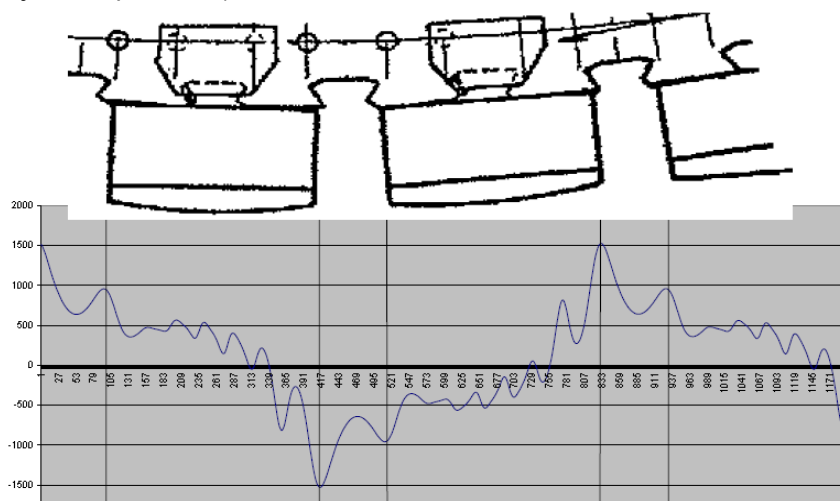
Slika 7. Blok dijagram dela algoritma za akviziciju podataka (merenja)

Na slici 6. prikazana je prednja maska (front panel) algoritma za akviziciju podataka (merenja). Sa panela se može podešavati ulazni kanal za procesiranje signal (DAQmx Physical Channel) kao i drugi parametri akvizicije, kontrola ispravnosti merenja kao i dijagram izmerenih vrednosti. Na slici 7. dat je blok dijagram dela algoritma za akviziciju podataka.

Urađen je čitav niz drugih algoritama za merenje, prikupljanje i obradu podataka koji se odnosi na magnetni monitoring hidrogenatora, turbogeneratore, visokonaponskih motora i budilica.

#### 4. Magnetni monitoring za hidrogenatore

U mašinama sa istaknutim polovima, radijalni magnetni fluks svakog pola zavisi od aktivnog i reaktivnog opterećenja mašine. Za referentna snimanja na svakoj mašini treba uzeti podatke pod različitim uslovima opterećenja od praznog hoda do punog opterećenja. Takođe treba pratiti promenu i drugih veličina kao što su vibracija ležaja (budući da to može biti znak kratkospojenih navojaka na polovima).



**Slika 8.** Skica rotora sa odgovarajućim snimljenim signalom [8]

Rezolucija prikupljenih podataka mora biti dovoljno velika tako da je mereni signal bar za red veličine veći od varijacija signala sa senzora.

Slika 8. prikazuje tipičan signal sa jednog senzora a iznad njega fizičko podudaranje sa karakterističnim pozicijama polova. Signal sa senzora je elektromotorna sila. Vrednost indukcije se dobija određenim izračunavanjima (sumiranje i dr.). Kao što se može videti, pikovi signala koincidiraju sa stranama namotaja rotora gde je promena fluksa najveća. Takođe promena fluksa nije uniformna ni preko pola. Promena fluksa nije simetrična od jedne strane pola ka drugoj (osim slučaja u praznom hodu). Promena fluksa je



simetrična i uporediva gledano od pola do pola kada nema kvara, tj. u regularnom radu).

U tabeli 3. je lista elektrana i generatora na kojima su vršena merenja.

**Tabela 3.** Lista elektrana i mašina na kojima su vršena merenja

<b>Elektrana</b>	<b>Snaga MW</b>	<b>Broj polova</b>	<b>Broj navojaka po polu</b>	<b>Generator</b>
<b>Bistrica</b>	52	10	43+1	B
<b>Potpeć</b>	18	32	23+1	C
<b>Međuvršje</b>	5.6	10	x	A
<b>HE Piva</b>	110	x	x	A

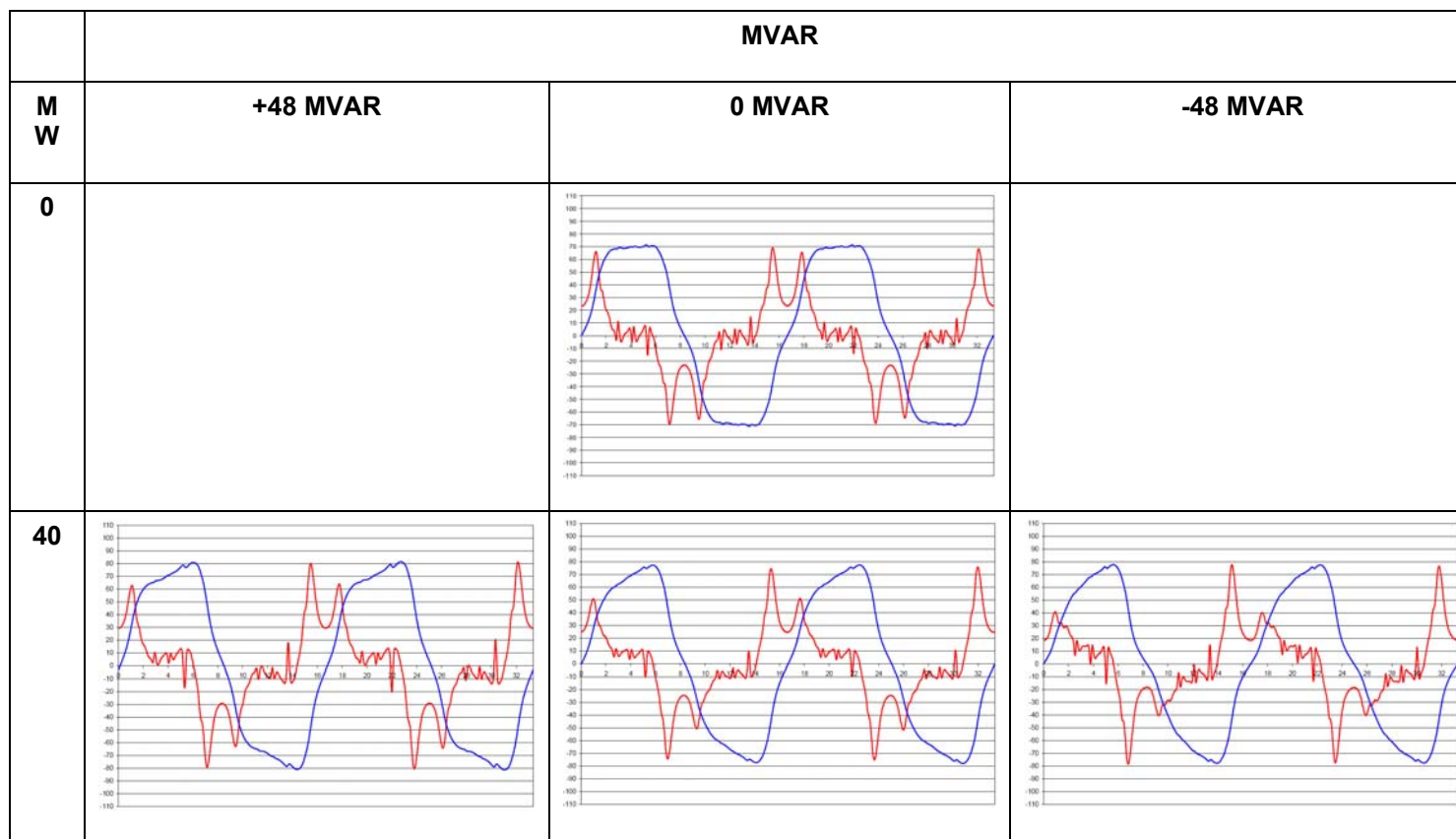
#### **4.1. Značaj opterećenja za magnetni monitoring**

Veličina relativne opterećenosti generatora (odnos trenutne i naznačene snage) kao karakter opterećenosti generatora (odnos aktivne i reaktivne snage) su parametri koji značajno utiču na merne signale odnosno na njihove dijagrame. Slika 9. prikazuje promenu karakteristika signala prema vrednosti i karakteru opterećenja (vertikalno aktivna i horizontalno reaktivna snaga).

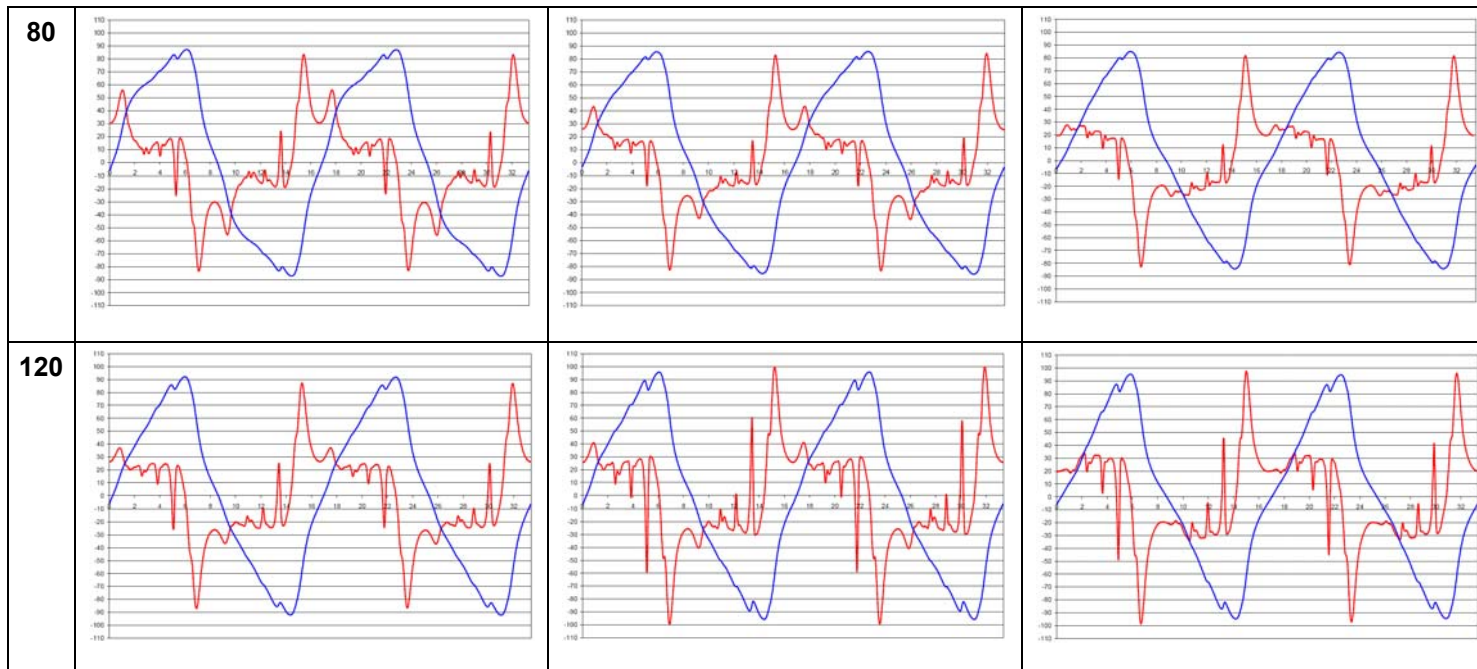
Podaci se normalizuju do vrednosti 100 za slučaj 120MW, 0VAR (puno opterećenje za ovu mašinu). Merenja su pokazala da promena opterećenja izaziva najveću promenu fluksa na početku polova. Postoje dve komponente fluksa prisutne u datim električnim mašinama (generatorima), komponenta glavnog fluksa koji potiče od pola rotora i komponenta statorskog fluksa. Oni se različito ponašaju u odnosu na opterećenje generatora što dovodi do toga da raspodela fluksa preko pola ili indukcija na polu, više nisu simetrične.

#### **4.2. Algoritmi za hidrogeneratore**

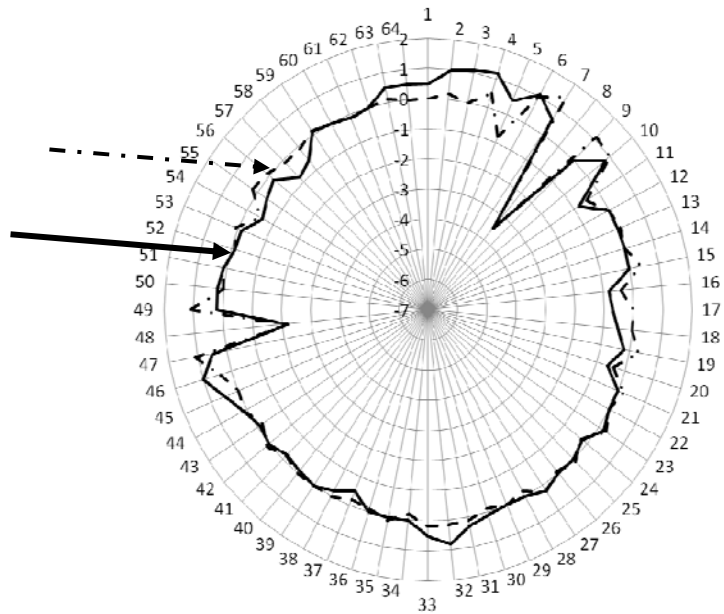
Osnovni algoritam izračunava pikove indukcije za svaki pol, izračunava njegov odnos prema srednjoj vrednosti pikova svih polova kao i sa srednjom vrednošću pikova dva odnosno četiri susedna pola. Ukupan fluks je srazmeran broju navojaka pola N i ako je jedan navojak kratko spojen onda se ukupni fluks smanjuje za  $1/N$ . Obično imamo od 15 do 40 navojaka i rezolucija merenja treba da bude veća od 1 prema 40 (2,5%). Na slici 10. je vidljivo prisustvo kratkospojenih navojaka polova broj 8 (tri kratkospojena navojka) i 48 (jedan kratkospojeni navojak).



Slika 9. (prvi deo) Grafici signala i sumiranih podataka prema stanju aktivnog (MW) i reaktivnog (MVAR) opterećenja [8]

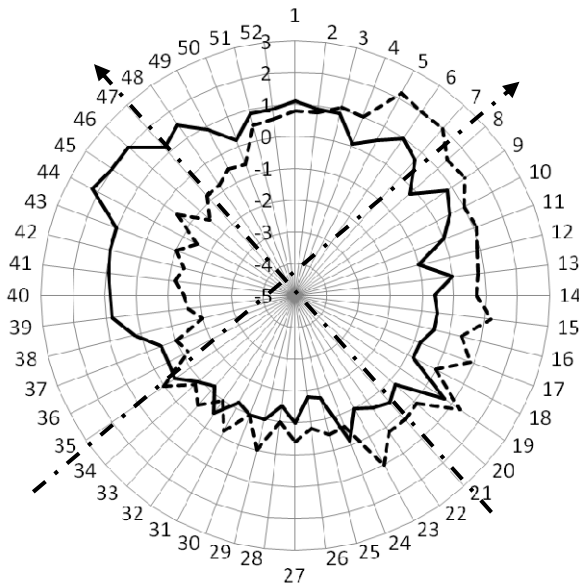


**Slika 9.** (nastavak) Grafici signala i sumiranih podataka prema stanju aktivnog (MW) i reaktivnog (MVAR) opterećenja [8]



**Slika 10.** Radijalni prikaz rasporeda polova i razlika pikova indukcije, sa kratkospojenim navojcima. Puna strelica (linija) pokazuje krivu razlike pika pola prema srednjoj vrednosti pikova. Isprekidana strelica (linija) pokazuje krivu razlike pika pola prema dva susedna pola (prethodnom i narednom) [8]

orijentacija za sondu 1



orijentacija za sondu 2

**Slika 11.** Poređenje pikova integralnog signala sa dva senzora fluksa sa srednjom vrednošću pikova svih polova integralnog signala [8]

Očekivane promene u piku indukcije (1/21, 5% i 3/ 21,14%) su veće od izmerenih. Pretpostavlja se da još uvek postoji određena količina struje koja se kreće kroz navojke polova koji su kratkospojeni.

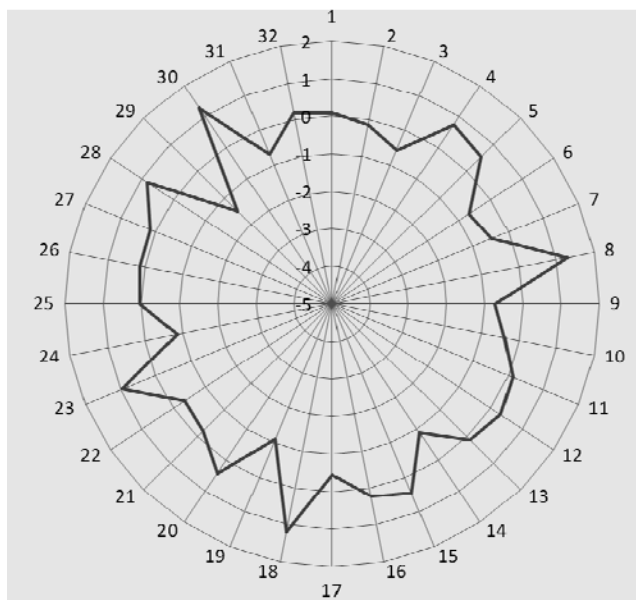
Slika 11. prikazuje rezultate merene na dve pozicije sonde koje su pomerene za 90°. Ova varijacija rezultata može biti usled promena u prostoru između statora i rotora, usled nesimetrije statora ili rotora ili neke druge nesimetrije.

### 4.3. Merenja na hidro generatorima EPS

U okviru studije vršena su merenja fluksa (magnetne indukcije) na više generatora. U elektranama „Međuvršje“, „Bistrica“ i „Potpeć“ ugrađene su sonde za magnetni monitoring. Merenja su vršena i na generatoru hidroelektrane „Piva“.

#### 4.3.1. Merenja na generatoru C, HE Potpeć

Hidroelektrana „Potpeć“ ima dva generatora snage 18 MW. Mašine su sa 32 pola. Ugrađeni su senzori u ventilacioni kanal statora. Brzina odabiranja je bila 200 kS/s, što znači da za jedan pol pripada približno 67 semplova po periodu a ukupan izabrani broj odbiraka pokriva dve rotacije mašine.



**Slika 12.** Radijalni dijagram raspodele odnosa vrednosti indukcije pola u odnosu na srednju vrednost indukcije dva susedna pola (prethodni i naredni) u %

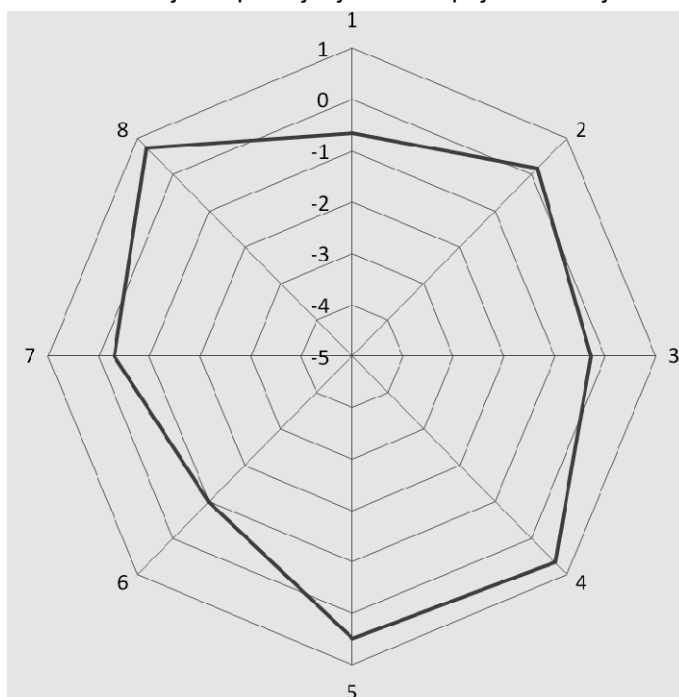
Rezultati merenja, odnosno izračunavanja indukcije, prikazani su na slici 12. gde se mogu uočiti fluktuacije reda 2%. Za data 23 + 1 navojka (po polu) imamo za jedan kratkospojeni navojak promenu fluksa od 4.17% (teorijski posmatrano). Na slici 13. varijacije fluksa su od -1.5% do 1.3% . Rezultati ukazuju na nepostojanje kratkospojenih navojaka i ukazuju na nivo normalnih fluktuacija rezultata.

#### 4.3.1. Merenja na generatoru B, HE Bistrica

Hidroelektrana „Bistrica“ ima dva generatora snage 52 MW. Mašine su sa 10 polova. Ugrađeni su senzori u ventilacioni kanal statora. Brzina odabiranja je bila 100 kS/s a ukupan broj odbiraka pokriva dve rotacije.

Rezultati merenja i obrade su prikazani na slici 14. gde se mogu uočiti fluktuacije reda 1%.

Polovi generatora imaju 43 + 1 navojka po polu tako da jedan kratkospojeni navojak daje promenu fluksa od 2,27% (teorijski posmatrano). Stoga rezultati ne ukazuju na postojanje kratkospojenih navojaka.

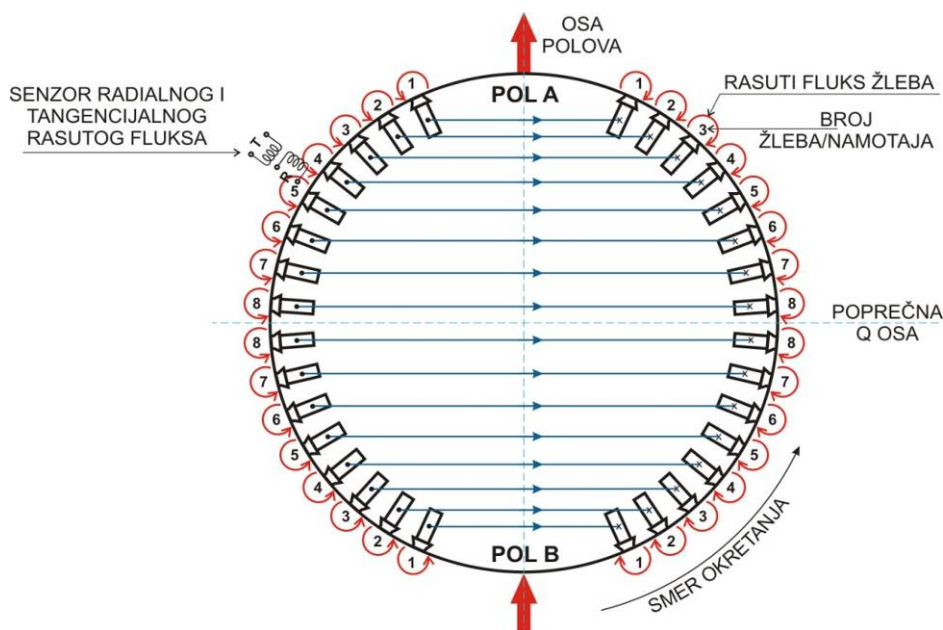


**Slika 13.** Radijalni dijagram raspodele odnosa vrednosti indukcije pola u odnosu na srednju vrednost indukcije za četiri susedna pola (dva prethodna i dva naredna) u %

## 5. Otkrivanje kratkospojenih navojaka na rotoru turbogeneratora

Na slici 14. je prikazan poprečni presek dvopolnog rotora turbogeneratora, kroz čiji namotaj teče struja koja stvara magnetno polje u smeru ose polova. Kao primer izabran je rotor sa 8+8 žlebova po polu, odnosno sa 8 namotaja-kanura po polu. Na slici 14. označeni su brojem 1 najkraći namotaji i žlebovi koji su najbliži osi polova, a brojem 8 najduži namotaji i žlebovi koji su najbliži poprečnoj Q osi polova A i B. Prikazan je i deo rasutog fluksa koji stvaraju provodnici-štapovi u svakom žlebu kao i senzor rasutog fluksa.

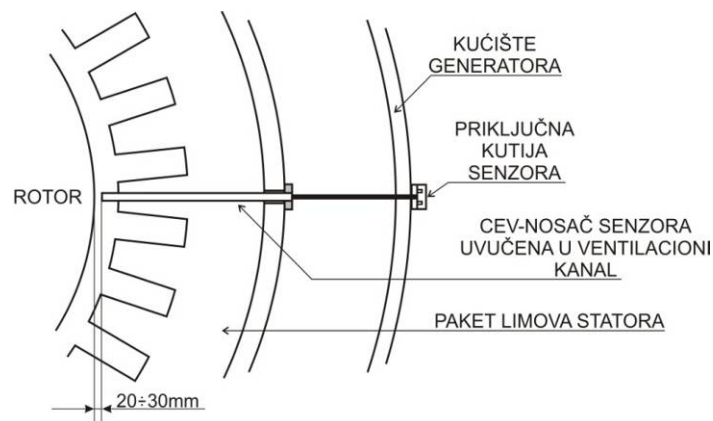
Senzor fluksa je tako postavljen da se sve vreme nalazi u međugvožđu na dovoljnom i bezbednom rastojanju od rotora, a da pri tome može da registruje promenu fluksa rasipanja u međugvožđu. S obzirom da u međugvožđu postoji glavni fluks rotora i fluks statora, razvijena je metoda čijom primenom je moguće otkriti, odrediti lokaciju i proceniti broj kratkospojenih navojaka.



**Slika 14.** Šema poprečnog preseka dvopolnog rotora sa senzorom i rasutim fluksom u blizini žlebova [4, 9]

### 5.1. Montaža senzora za monitoring fluksa kod turbogeneratora

Na slici 14. su prikazani senzori rasutog fluksa (radijalnog i tangencijalnog), koji se inače nalaze u nemagnetnoj cevi prečnika manjeg od 10 mm, a koja je uvučena kroz ventilacioni kanal. Ovakvo rešenje (senzor radijalnog rasutog fluksa je motan na kalemu vrlo malog prečnika) podrazumeva pozicioniranje senzora na malom rastojanju od površine rotora (2-3)cm sa ciljem da se dobije dovoljna vrednost signala pogodna za dalju obradu. Takođe, ovakvo rešenje podrazumeva poštovanje određenih procedura prilikom vađenja rotora iz generatora, tj. potrebno je demontirati cev sa sensorima, uvlačenjem cevi u ventilacioni kanal kako se cev ne bi nalazila u međugvožđu u trenutku prolaska rotorske kape pored senzora tokom vađenja ili postavljanja rotora u generator i na taj način zaštitila od oštećenja. Na slici 15. je prikazan senzor sa nosačem instaliran u turbogeneratoru.



**Slika 15.** Senzor sa nosačem instaliran u turbogeneratoru [4]

### 5.2. Analiza merenja kod turbogeneratora

Na dijagramu sa slike 16. prikazan je deo signala koji je dobijen na senzoru radijalnog rasutog fluksa ugrađenog u generatoru A6 u TENT-u A, koji je bio opterećen [11].

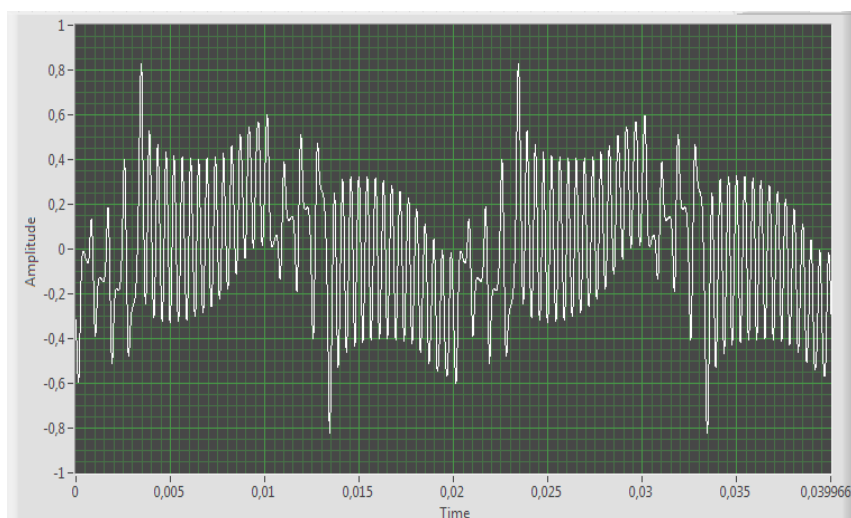
Analiziranjem dijagrama sa slike 16. i poprečnog preseka rotora sa slike 14. mogu se doneti neki zaključci:

- četiri gusto grupisana signala sa senzora odgovaraju prolasku po 16 žlebova (sa desne ili leve strane ose polova) oba pola (8+8) u kojima se nalaze navojci namotaja rotora, pri čemu pobudna struja, odnosno struja rotora ima u jednoj poluperiodi jedan smer, a u drugoj drugi smer,



- četiri druge grupe signala odgovaraju prolasku po tri žleba u kojima se nalaze samo štapovi prigušnog namotaja.

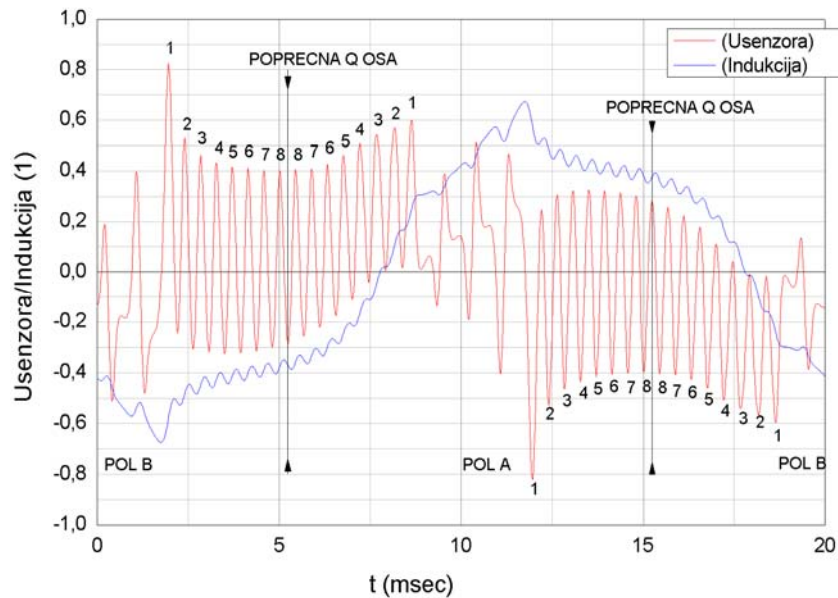
Očitane vrednosti pojedinih veličina, za vreme sprovedenih merenja, su bile:  $P=290,7\text{MW}$ ,  $Q=0,8\text{MVAR}$ ,  $U=14.662\text{V}$ ,  $I=11.552\text{A}$ ,  $U_{\text{pob}}=102\text{V}$ ,  $I_{\text{pob}}=2.418\text{A}$ . Podaci na tablici generatora:  $S=367\text{MVA}$ ,  $\cos \varphi = 0,84$ ,  $U=15.000\text{V}$ ,  $I=14.126\text{A}$ .



**Slika 16.** Signal na senzoru radialnog rasutog fluksa (A6, TENT A)

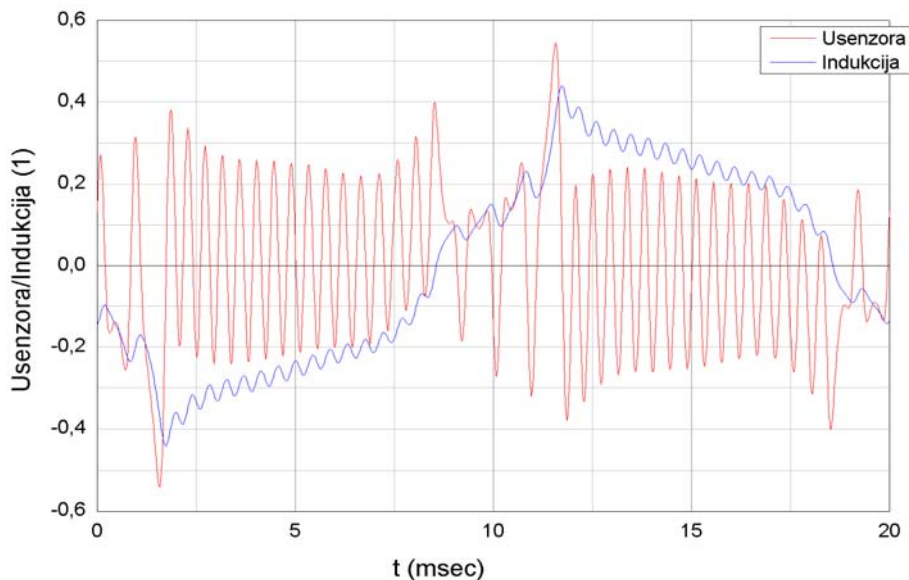
Na slici 17. prikazan je signal na senzoru fluksa i indukcija koja je dobijena integraljenjem krive dobijene akvizicijom signala sa senzora fluksa. Označeni su brojevi žlebova (pola A i B) iznad vršnih vrednosti signala na senzoru i poprečna Q osa (označena vertikalnom linijom).

Vrednost indukcije je izračunata jer se tokom razvoja i usavršavanja ove metode došlo do zaključka da je otkrivanje kratkospojenih navojaka najpouzdanije kada se poklope trenuci prolaska nekog žleba ispod senzora i prolaska indukcije kroz nulu. Glavni fluks ima osobinu da menja svoj oblik i raspodelu na površini rotora sa promenom opterećenja generatora od praznog hoda do punog opterećenja. Generator bez opterećenja ali sa nominalnim izlaznim naponom, ima približno trapezoidni oblik indukcije, a prolazak kroz nulu je u neutralnoj zoni, dok je u sredini polova vrednost glavnog fluksa najveća. Sa povećanjem opterećenja generatora, reakcija statorskog namotaja koja je posledica struje statora, značajno menja oblik rezultantne indukcije. Nulta vrednost glavnog fluksa, odnosno prolazak kroz nulu će se pomeriti od žleba koji je bio najdalji od pola, prema žlebu koji je bliži istom polu, sa povećanjem opterećenja generatora.



**Slika 17.** Signal na senzoru radialnog rasutog fluksa i indukcija u međugvožđu

Trenutak prolaska žleba br.3 pola A (slika 17.) odgovara prolasku indukcije kroz nulu. To praktično znači da se sa najvećom sigurnošću može proceniti postojanje kratkospojenih navojaka samo u žlebu br.3 generatora A6.



**Slika 18.** Signal na senzoru tangencijalnog rasutog fluksa i indukcija u međugvožđu

Na slici 18. je dat dijagram koji je uporediv sa dijagramom na slici 18., a koji predstavlja signale koji su dobijeni sa senzora tangencijalnog rasutog fluksa. Senzori tangencijalnog i radijalnog rasutog fluksa daju dovoljno informacija na osnovu kojih je moguće dati procenu o postojanju kratkospojenih navojaka u namotaju rotora.

Jedan od načina otkrivanja kratkospojenih navojaka je dat u tabeli 4. kao primer procene broja kratkospojenih navojaka u namotaju rotora magnetnim monitoringom turbogeneratorsa.

**Tabela 4.** Primer procene broja kratkospojenih navojaka u namotaju rotora magnetnim monitoringom turbogeneratorsa [10]

Broj žleba	Broj navojaka po žlebu	Pol A – pik napona	Pol B – pik napona	Odnos A/B	Odnos B/A	Otkriven kratkospojeni navojak na polu A	Otkriven kratkospojeni navojak na polu B
1	20	0.845	0.847	0.997	1.003	NE	NE
2	25	0.809	0.813	0.996	1.004	NE	NE
3	25	0.773	0.743	1.040	0.961	NE	<b>DA</b>
4	25	0.670	0.668	1.002	0.998	NE	NE
5	25	0.518	0.522	0.992	1.008	NE	NE
6	25	0.435	0.432	1.006	0.994	NE	NE

## 6. Smernice za uvođenje magnetnog monitoringa obrtnih mašina u praksu EPS

Svetska praksa u oblasti magnetnog monitoringa obrtnih mašina je bogata i seže nekoliko decenija unazad. Savremena praksa se posebno razvija upotrebom savremenih sredstava za merenja, akviziciju i obradu podataka. Dostupna je brojna literatura novijeg datuma i svakim danom se objavljuje veliki broj naučnih i stručnih članaka, studija i knjiga. Takođe se na tržištu nudi raznovrsna oprema, uređaji i softver za merenja, akviziciju i obradu podataka magnetnog monitoringa.

Stečena domaća iskustva omogućavaju dalji razvoj magnetnog monitoringa koji treba da dovede do realizacije pogodnih senzora za ugradnju u različite tipove generatora i motora kao i razvoj prenosivog industrijskog uređaja ili uređaja za trajnu ugradnju u elektranama EPS.

Iskustva pokazuju da se uslovi i mogućnosti merenja, načini mogućeg postavljanja senzora, nivo korisnog signala i nivo smetnji, normalne fluktuacije rezultata merenja, rezolucija merenja u odnosu na mogući kvar, algoritmi za akviziciju i obradu podataka, uticaj rasutog magnetnog polja na metrološke karakteristike merne opreme i niz drugih faktora značajno razlikuju od mašine

do mašine. Stoga se dalji rad na razvoju magnetnog monitoringa nužno mora nastaviti u nekoliko pravaca.

U prvom redu za svaku mašinu, na koju bi se trajno postavila oprema za magnetni monitoring, treba uraditi preliminarna istraživanja koja će dati potrebne odgovore neophodne za projektovanje i trajnu ugradnju magnetnog monitoringa.

Nakon toga treba dati karakteristike spoljašnjih signalnih veza imajući u vidu okruženje sa velikim intenzitetom smetnji i često potrebnim velikim distancama između senzora i merno akvizicionog uređaja. U tom smislu je od posebnog značaja utvrditi uticaj načina zaštite od smetnji merne opreme (oklapanje), načina uzemljavanja itd. na karakteristike mernog signala.

Na kraju dolazi izrada adekvatnih algoritama. Usvojeni modularni koncept pravljenja algoritama na bazi softvera LabVIEW omogućava prilagođavanje merenja, akvizicije i obrade rezultata konkretnim uslovima. Razvijene algoritme treba unaprediti, pogotovo u izvesnim slučajevima primene kod turbogeneratorsa, gde je neophodna i merna oprema sa boljim karakteristikama od one sa kojom se trenutno raspolaže.

Jedna od aktivnosti daljeg razvoja magnetnog monitoringa obrtnih mašina jesu eksperimentalna istraživanja. S obzirom da se u hidroelektranama Đerdap 1 i Bajina Bašta, a u perspektivi i nekim drugim, demontiraju stari generatori to daje mogućnost istraživanja odziva merne opreme na kratko spajanje jednog ili više navojaka na polu. Time bi se na najbolji mogući način utvrdile potrebne karakteristike senzora i merno akvizicione opreme za nove generatore koji će biti izgrađeni.

Neophodno je formirati određenu bazu podataka u kojoj bi se čuvali podaci merenja i analiza.

## Literatura

- [1]. Neven Srb, "Magnetski monitoring električnih rotacijskih strojeva", 2004., Zagreb
- [2]. I.Ahmed, R.Supngat, J.Grieger, N.Ertugrul, W.L.Soong, "A Baseline Study for On-Line Condition Monitoring of Induction Machines", AUPEC2004 – Australasian Universities Power Engineering Conference, 26-29 September 2004, Brisbane, Australia
- [3]. Dr. J. Haldemann, EMC Aspects in Power Plants The Magnetic Field Outside Turbogenerators, Alstom Power Thermal Products Turbogenerator Product Line, Electrical Basics, Bern, 28.05.2010
- [4]. Zoran Obradović, Studija br. 408059, Magnetni monitoring obrtnih električnih mašina u elektranama Elektroprivrede Srbije, I Faza; EPS, Beograd 2009.

- [5]. Voitto Kokko, "Condition monitoring of squirrel-cage motors by axial magnetic flux measurements", Academic Dissertation, Faculty of Technology, University of Oulu, Finska, 2003.
- [6]. H.Henao, C.Demian, G.-A.Capolino, "A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor" IEEE Transactions on Industry Applications, Sept.-Oct. 2003., Volume 39, Issue 5, pp. 1272-1279.
- [7]. A.H.Bonnett, "A Methodology for A.C. Motor Failure Analysis", Emerson Electric, Application Paper
- [8]. Electric Power Research Institute (EPRI), California, USA, Project Opportunity (March 2003) – "Field Testing of Continuous Hydrogenerator Air-Gap Flux Monitor"
- [9]. J.Kapler, S.Campbell, M.Credland, "Continuous automated flux monitoring for turbine generator rotor condition assessment", Iris Power Engineering Inc., Toronto, Canada, EPRI WORKSHOP Charlotte, NC, 27. July 2004.
- [10]. GE Energy Services, "Detection of Shorted Turns in Generator Field Windings", General Electric
- [11]. S.Spasojević, Z.Božović, I.Zec, Dr.D.Petrović, Dr.M.Dragović, "Kontrola ispravnosti izolacije namotaja rotora u toku rada turbogeneratorsa", Juko Cigre, 19. savetovanje, 8-13.05.1989, Bled, Ref.br. 11.27, strane: 241-250.

**Abstract:** Shorted turns are the result of failed insulation between individual windings in generator rotors. The use of air-gap magnetic flux probes has proven effective in the detection of generator rotor winding shorted turns. Analysis of air-gap flux probe data can determine the number and location of shorted turns. Here are presented some results of measurements in power plants. Finally, guidelines are given for the installation of magnetic monitoring in practice.

**Key words:** shorted turns, generators, magnetic flux

## Magnetic Monitoring of Power Generators in EPS

Rad primljen u uredništvo 19.09.2011. godine

Rad prihvaćen 21.10.2011. godine