

**PRIMENA SOFTVERSKOG PAKETA TESTPOINT U DIJAGNOSTICI STANJA ASINHRONIH MOTORA METODOM SPEKTRALNE ANALIZE OSOVINSKOG NAPONA  
APPLICATION SOFTWARE PACKET TESTPOINT IN DIAGNOSTICS OF INDUCTION MOTORS BY USING THE METHOD OF SPECTRAL ANALYSIS OF SHAFT VOLTAGE**

Božo Ilić - Tehnički školski centar Zvornik, Živoslav Adamović - Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin, Branko Savić - Visoka tehnička škola strukovnih studija u Novom Sadu

**REZIME:** Cilj ovog rada jeste da pokaže da se primenom metode spektralne analize osovinskog napona, zasnovane na korišćenju programskog paketa TestPoint, mogu dobiti zadovoljavajući rezultati u dijagnostici stanja kaveza rotora asinhronih motora, kao i da se primenom ove metode mogu utvrditi uzroci pojave struja, koje mogu izazvati oštećenja ležajeva motora kroz koje protiču. U radu su takođe navedena ograničenja i prednosti koje ima ova dijagnostička metoda.

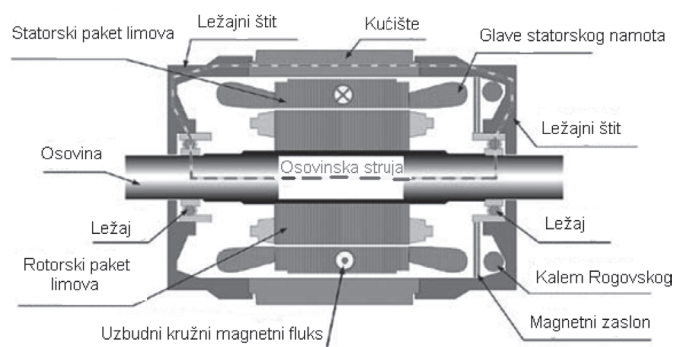
**KLJUČNE REČI:** asinhroni motori, dijagnostika stanja, osovinski napon, programski paket TestPoint, spektralna analiza.

**ABSTRACT:** The aim of this paper is to show that using the method of spectral analysis of shaft voltage, based on the use of the software package Testpoint, can get satisfactory results in monitoring of cage rotor induction motors. And that the application of these methods can determine the causes of the current, which can cause damage to the motor bearings through that flow. The paper also listed the limitations and advantages of this diagnostic method.

**KEY WORDS:** asynchronous motors, diagnostic status, shaft voltage, TestPoint software package, spectrum analysis.

**1. UVOD**

Zahvaljujući intenzivnom razvoju i primeni frekventnih pretvarača, asinhroni motori su se, i po upravljačkim karakteristikama, približili jednosmernim motorima, pa se mogu koristiti i u vrlo zahtevnim pogonim. Zbog toga, kao i zbog jednostavne konstrukcije i niske cene asinhroni motori su ugrađeni u 50 - 70 [%] elektromotornih pogona u industriji [1]. Neočekivana pojava oštećenja i ispad asinhronog motora iz pogona mogu uzrokovati velike troškove i zastoje procesa različite vrste. Primenom adekvatnih dijagnostičkih metoda, oštećenja se mogu otkriti na vreme odnosno u početnoj fazi nastanka. U tom slučaju, popravke asinhronih motora se vrše u tehnološki najpovoljnijem trenutku, a planiranje remonta i nabavka rezervnih delova je olakšana [1]-[3].



Slika 1. Zatvorena kontura kojom protiče struja uzrokovana osovinskim naponom asinhronog motora

Svaka vrsta oštećenja asinhronog motora odražava se na povećanje njegove magnetne nesimetrije, što uzrokuje pojavu malog rezultantnog fluksa kroz osovinu, koji dovodi do indukovanja elektromotorne sile između njenih krajeva, čija frekvencija i vrednost zavise od uzroka i stepena nesimetrije. Ta elektromotorna sila se naziva osovinski napon, koji ako je dovoljno veliki, može uzrokovati proticanje struje zatvorenom konturom koju obrazuje: osovina - prvi ležaj - prvi ležajni štiti

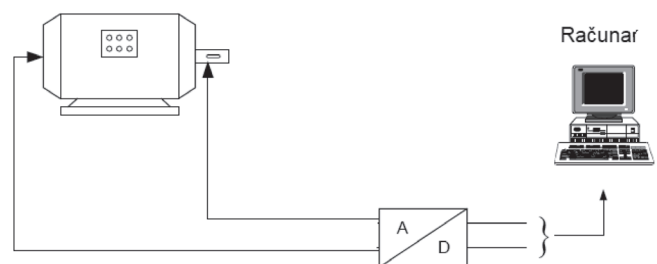
- kućište - drugi ležajni štiti - drugi ležaj - osovina, kao što se može videti sa slike 1 [3].

Danas se pokušava proveriti da li se kao dijagnostička veličina može koristiti osovinski napon odnosno da li se metodom spektralne analize osovinskog napona koji se indukuje u osovinama električnih mašina mogu doneti zaključci o stanju magnetnog kola, kao i o uzrocima i stepenima oštećenja asinhronih motora, kao što su: oštećenja kaveza rotora, statička i dinamička ekscentričnost, međuzavojni kratki spojevi statorskog i rotorskog namota (kod klizno-kolutnih motora), gubitak jedne faze napajanja itd. Metoda je nedestruktivna i jednostavno primenjiva uz korišćenje računara, pomoću koga se vrši prikupljanje, obrada i prikaz snimljenih podataka [4], [5].

Cilj ovog rada jeste da pokaže da se primenom metode spektralne analize osovinskog napona, zasnovane na korišćenju programskog paketa TestPoint, mogu dobiti zadovoljavajući rezultati u dijagnostici stanja kaveza rotora asinhronih motora, kao i da se primenom ove metode mogu utvrditi uzroci pojave struja, koje mogu izazvati oštećenja ležajeva motora, kao što su npr.: struje uzrokovane frekventnim pretvaračem preko koga se motor napaja, lutajuće struje itd.

**2. KORIŠĆENA OPREMA I OPIS ISPITIVANJA**

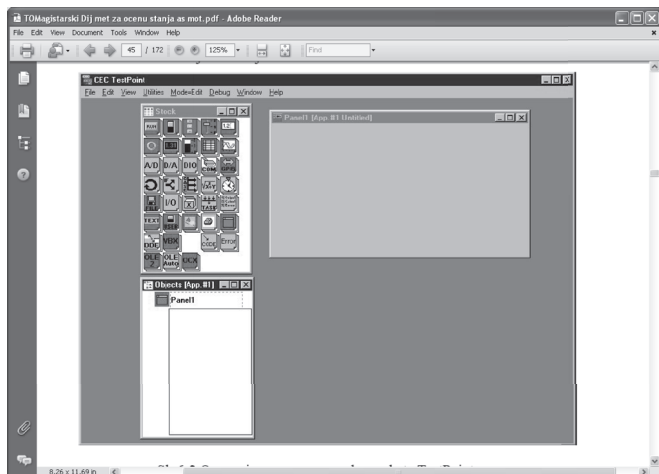
Dijagnostička ispitivanja asinhronih motora metodom spektralne analize osovinskog napona vršena su u laboratorijskim uslovima prema principijelnoj šemi prikazanoj na slici 2.



Slika 2. Principijelna šema prema kojoj su vršena dijagnostička ispitivanja asinhronih motora

S obzirom da se tokom snimanja osovinskih napona nisu mogli ostvariti čvrsti kontakti sa osovinom, zbog njenog obrtanja, korišćene su dve metalne četkice koje su klizile po oba kraja osovine, kako bi se ostvarili što bolji kontakti tj. kontakti sa što manjim prelaznim otporima između osovine i četkica.

Snimanja i analiza osovinskih napona su vršeni pomoću personalnog računara na kome je instalisan vlastiti program za dijagnostiku stanja asinhronog motora primenom ove metode, koji ima mogućnost praćenja stanja tokom dužeg vremenskog perioda, uz mogućnost formiranja baze podataka ispitivanih motora. Program je izrađen u programskom paketu TestPoint, čiji je osnovni prozor prikazan na slici 3.



Slika 3. Osnovni prozor programskog paketa TestPoint

Programski paket TestPoint je namenjen za akviziciju (prikupljanje), obradu i prikaz (snimljenih i obrađenih) podataka na različite načine, bilo numerički, bilo grafički (npr. stupčasti prikazi, prikazi talasnih oblika, prikazi frekventnog spektra, grafički prikazi u obliku analognih instrumenata sa kazaljkom itd.). Za analizu podataka na raspolaganju su mogućnosti filtriranja, spektralne analize, izgladivanja i usrednjavanja krivih itd. Pri obradi krivih na raspolaganju su aproksimacije (interpolacije) pravcima, polinomima, eksponencijalima i sl. Programski paket TestPoint u sebi sadrži kontrole za upravljanje spoljašnjim uređajima, matematičke funkcije za rad sa promenljivim, vektorima, matricama, funkcije za kreiranje korisničkih interfejsa, izradu protokola merenja itd. [6]-[8]. Prilikom izrade programa gotovi objekti se mišem odvlače iz skladišta i postavljaju u radni panel, gde se međusobno povezuju. Prilikom postavljanja određenog objekta u radni panel, program nudi izbor neke od unapred definisanih naredbi, koje su različite za svaki tip objekta, tako da se pisanje programa u stvari svodi na izbor jedne od naredbi. Znači ovde se vrši vizualno programiranje, čime je znatno olakšana izrada programa

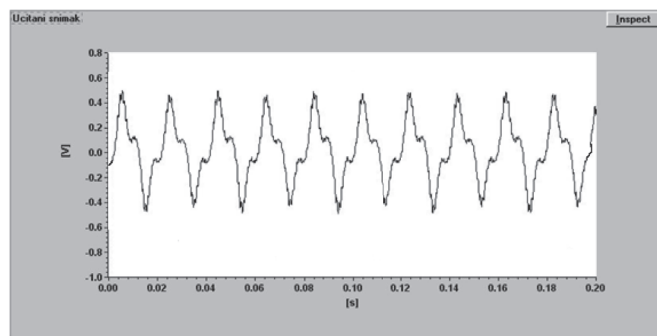
Ispitivanja su vršena na asinhronom motoru nominalne snage  $P_n=600$  [kW], nominalnog napona  $U_n=3$  [kV], nominalne struje  $I_n=25$  [A], faktora snage  $\cos\varphi=0,8$ , nominalne brzine  $n_n=590$  [ob/min], frekvencije  $f=50$  [Hz]. Pre sprovođenja ispitivanja motor je servisiran i doveden u ispravno stanje. Važno je naglasiti da ispravno stanje motora nije isto kakvo je bilo kada je motor bio nov, ali se stanje nakon servisa može smatrati ispravnim.

Ispitivanja su vršena u laboratorijskim uslovima, pri ispravnom (neoštećenom) kavezom rotora i pri namerno izaz-

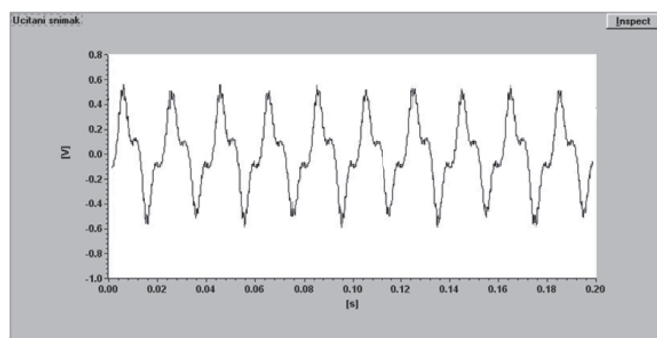
vanim oštećenjima kaveza rotora. Snimanja osovinskih napona su vršena za različite stepene oštećenja, pri različitim opterećenjima.

### 3. REZULTATI ISPITIVANJA

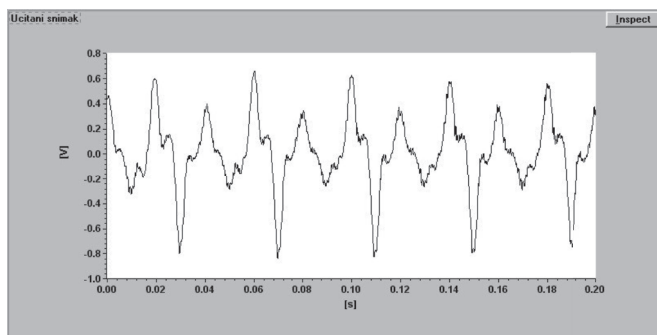
Rezultati dobijeni snimanjem talasnih oblika indukovanih osovinskih napona motora sa ispravnim kavezom rotora, motora sa jednim prekinutim štapom kaveza rotora i motora sa teškim oštećenjem kaveza rotora motora, pri struji opterećenja od 20 [A] prikazani su na slikama 4, 5, i 6 respektivno. Sa ovih slika može se uočiti da se pojavom oštećenja kaveza rotora talasni oblici osovinskih napona izobličavaju i da su ta izobličenja izraženija što su oštećenja veća.



Slika 4. Talasni oblik osovinskog napona motora sa ispravnim (neoštećenim) kavezom rotora pri struji opterećenja od 20 [A]



Slika 5. Talasni oblik osovinskog napona motora sa jednim prekinutim štapom kaveza rotora pri struji opterećenja od 20 [A]



Slika 6. Talasni oblik osovinskog napona motora sa teškim oštećenjem kaveza rotora pri struji opterećenja od 20 [A]

Pošto se analizom talasnih oblika osovinskih napona, može samo ustanoviti da postoje oštećenja motora, ali ne i njihov uzrok i stepen, izvršeno je prebacivanje rezultata iz vremenskog

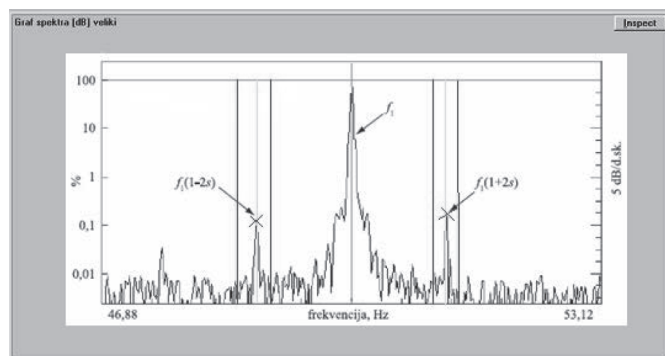
domena u frekventni domen u kome se može doći do mnogo preciznijih zaključaka. Pomoću kartice A/D pretvarača DAS50 ugrađene u računar vršena je Fourierova transformacija, kojom su snimljeni talasni oblici rastavljeni na harmonike, tako da se na monitoru računara mogu videti da frekventni spektri osovinskih napona, uz harmonike koji su karakteristični za ispravan kavez rotora motora, sadrže superponirane i dodatne bočne harmonike, koji su karakteristični za oštećeni kavez rotora motora (npr. oštećene štapove i prstenove ili loše njihove spojeve), na frekvencijama:

$$f_{bh} = f_1(1-2\cdot s) \quad (1)$$

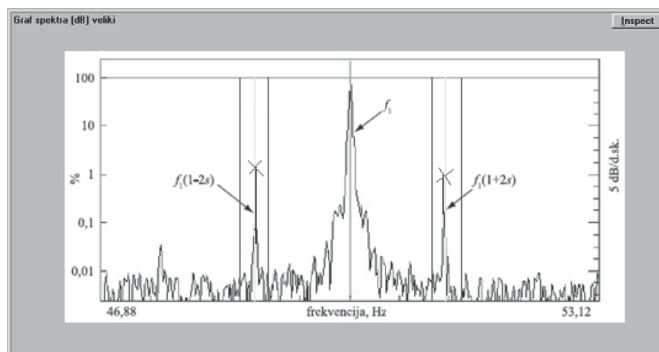
$$f_{bh} = f_1(1+2\cdot s) \quad (2)$$

Na osnovu frekvencija dodatnih bočnih harmonika može se utvrditi uzrok, a na osnovu vrednosti dodatnih bočnih harmonika može se utvrditi stepen oštećenja kaveza rotora. Što je oštećeno više štapova, vrednosti dodatnih bočnih harmonika su veće. Kako su u stvarnim uslovima vrednosti dodatnih bočnih harmonika obično znatno manje od vrednosti osnovnog harmonika, njihove vrednosti iz frekventnog spektra osovinskog napona izražene u voltima je teško očitati, pa je teško i doneti dijagnostički zaključak o stanju motora. Zbog toga je izvršeno prebacivanje frekventnog spektra osovinskog napona u daleko pogodniji logaritamski prikaz, u kome su vrednosti pojedinih harmonika izražene u decibelima. Osnovnom harmoniku su pridružene vrednosti 100 [%], dok su ostali harmonici poprimali vrednosti izražene u [%] osnovnog harmonika. Na osnovu procenjene vrednosti klizanja motora program vertikalnim linijama obeležava pojas u kojem se mogu očekivati dodatni bočni harmonici. U obeleženom pojasu program traži maksimum i označava ga kursorom. Ako je vrednost klizanja dovoljno tačno određena, program će u većini slučajeva tačno označiti očekivane bočne harmonike. U realnim snimanjima procenjena vrednost klizanja može dosta odstupati od stvarne. U takvim slučajevima može se desiti da se bočni harmonik ne nalazi unutar obeleženog pojasa i program izabere pogrešnu vrednost. Tada, je potrebno ručno odabrati pravu vrednost bočnog harmonika. Izbor se vrši pomeranjem klizača, čime se automatski menjaju prikazane frekvencije bočnih harmonika i njihove vrednosti.

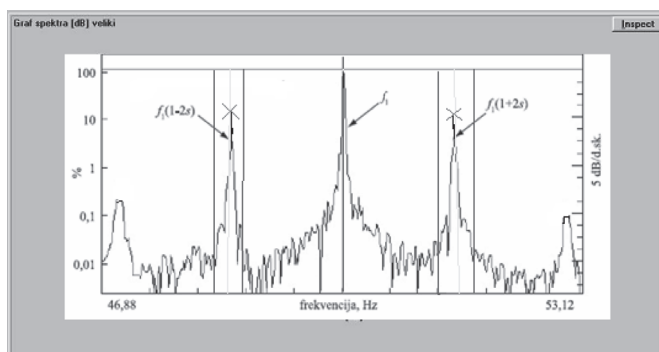
Rezultati dobijeni snimanjem frekventnih spektara indukovanih osovinskih napona motora sa ispravnim kavezom rotora, motora sa jednim prekinutim štapom kaveza rotora i motora sa teškim oštećenjem kaveza rotora motora, pri struji opterećenja od 25 [A] prikazani su na slikama 7, 8, i 9 respektivno.



Slika 7. Frekventni spektar osovinskog napona motora sa ispravnim (neoštećenim) kavezom rotora u okolini frekvencije 50 [Hz] pri struji opterećenja od 25 [A]



Slika 8. Frekventni spektar osovinskog napona motora sa jednim prekinutim štapom kaveza rotora u okolini frekvencije 50 [Hz] pri struji opterećenja od 25 [A]



Slika 9. Frekventni spektar osovinskog napona motora sa teškim oštećenjem kaveza rotora u okolini frekvencije 50 [Hz] pri struji opterećenja od 25 [A]

#### 4. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

Na osnovu procenjene vrednosti klizanja motora, program je označio da postoje dodatni bočni harmonici na frekvenciji  $f_1(1-2\cdot s)=48,34$  [Hz] i na frekvenciji  $f_1(1+2\cdot s)=51,66$  [Hz].

Sa slike 7 se vidi da su vrednosti dodatnih bočnih harmonika na frekvenciji  $f_1(1-2\cdot s)=48,34$  [Hz] i na frekvenciji  $f_1(1+2\cdot s)=51,66$  [Hz] zanemarljive (približno 0,3 [%]) u odnosu na osnovni harmonik  $f_1$ , čime je potvrđeno ispravno stanje kaveza rotora.

Sa slike 8 se vidi da su vrednosti dodatnih bočnih harmonika na frekvenciji  $f_1(1-2\cdot s)=48,34$  [Hz] i na frekvenciji  $f_1(1+2\cdot s)=51,66$  [Hz] male (približno 4 [%]) u odnosu na osnovni harmonik  $f_1$ , čime je potvrđeno postojanje manjih oštećenja kaveza rotora.

Sa slike 9 se vidi da su vrednosti dodatnih bočnih harmonika na frekvenciji  $f_1(1-2\cdot s)=48,34$  [Hz] i na frekvenciji  $f_1(1+2\cdot s)=51,66$  [Hz] značajne (približno 25 [%]) u odnosu na osnovni harmonik  $f_1$ , čime je potvrđeno postojanje težih oštećenja kaveza rotora.

Znači, analizom frekventnih spektara osovinskih napona prikazanih na slikama 7, 8, i 9 može se uočiti da postoje do-

datni bočni harmonici smešteni oko frekvencije mreže  $f_1$  na udaljenostima od  $\pm 2 \cdot s \cdot f_1$ , gde je  $s$  – klizanje, čime potvrđeno da su uzrok njihove pojave oštećenja kaveza rotora. Takođe analizom se može utvrditi da su vrednosti bočnih harmonika veće što su veća oštećenja kaveza rotora motora.

Pored navedenih dodatnih bočnih harmonika u frekventnim spektrima osovinskih napona uočeno je i postojanje dodatnih visokofrekventnih harmonika, koje je najverovatnije uzrokovao frekventni pretvarač preko koga se motor napaja. Ovi harmonici, takođe mogu stvoriti struje koje mogu dovesti do oštećenja ležajeva, zbog toga je potrebno obratiti pažnju na vrednosti ovih harmonika.

Znači, navedenom dijagnostičkom metodom moguće je otkriti oštećenja kaveza rotora motora. Međutim, postoji i veliki broj kvarova koji se manifestuju na isti ili slične načine što otežava primenu ove metode. Čak se i kod ispravnog motora, zbog nesavršenosti izrade i nekih specifičnih konstrukcionih rešenja rotora (npr. štapovi kaveza rotora nisu izolovani od paketa rotora) mogu pojaviti harmonici u spektru osovinskog napona bliski harmonicima uzrokovanim oštećenjima kaveza rotora [8], [9]. Vrednosti tih harmonika po pravilu nisu velike, ali je važno pratiti trend njihovog porasta, kako bi se oni mogli isključiti kao indikator oštećenja. Zbog toga se podaci prikupljeni pri sprovođenju ove metode memorišu u računaru u periodičnim vremenskim intervalima i međusobno porede. Ukoliko se ne uoče promene signala onda to upućuje na to da nije došlo do pogoršanja stanja motora, međutim ukoliko se uoče znatna (dvostruka ili višestruka) povećanja pojedinih spektralnih linija to je siguran znak da oštećenja motora rastu. Zbog toga je praćenje trenda promene (pogoršanja) stanja presudno u dijagnostici stanja asinhronih motora.

Dodatni problem predstavlja izvođenje zadovoljavajućih kontakata, koji osiguravaju siguran signal i ne zahtevaju zaustavljanje pogona.

## 5. ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata sprovedenih ispitivanja može se zaključiti da je (uz sva ograničenja koje ima ova kao i svaka druga metoda) metoda spektralne analize osovinskog napona, koja koristi savremena dostignuća razvoja računarske opreme, jedna od interesantnijih dijagnostičkih metoda, jer pored dijagnostike stanja kaveza rotora asinhronih motora, omogućava da se utvrdi poreklo struja, koje mogu izazvati oštećenja ležajeva motora, a koje mogu biti uzrokovane različitim uticajima (npr. uzrokovane frekventnim pretvaračem preko koga se motor napaja, lutajućim strujama i sl.), a ne samo oštećenjima kaveza rotora.

U daljim istraživanjima bilo bi zanimljivo razmotriti i mogućnosti primene metoda veštačke inteligencije prilikom donošenja dijagnostičkih zaključaka, čime bi se dijagnostički proces potpuno automatizovao.

## LITERATURA

- [1] Adamović, Ž., Adamović, M., *Tehnička dijagnostika*, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2008.
- [2] Adamović, Ž., Ašonja, A., *Teledijagnostika mašina*, Duga Knjiga, Sremski Karlovci 2011.
- [3] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Paunjorić, P., *Automatizovani dijagnostički sistemi električnih mašina*, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2012.
- [4] Antonino-Daviu, J.; Aviyente, S.; Strangas, E.; Riera-Guasp, M., *A scale invariant algorithm for the automatic diagnosis of rotor bar failures in induction motors*, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 27-30.06.2011., pp. 496-501
- [5] Betta, G.; Liguori, C.; Paolillo, A.; Pietrosanto, A., *A DSP-based FFT-analyzer for the fault diagnosis of rotating machine based on vibration analysis*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 51, No 6, 2002., pp. 1316-1322
- [6] Briz, F.; Degner, M. W.; Diez, A. B.; Guerrero, J.M., *Online diagnostics in inverter-fed induction machines using high-frequency signal injection*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 40, No 4, 2004, pp. 1153-1161
- [7] Comolli, L.; Saggini, B., *Evaluation of the sensitivity to mechanical vibrations of an IR Fourier spectrometer*, Review of Scientific Instruments, Vol. 76, No 12, 2005., pp. 123112-123112-8
- [8] Doosoo Hyun; Jongman Hong; Sang Bin Lee; Kwonhee Kim; Wiedenbrug, E.J.; Teska, *Automated Monitoring of Airgap Eccentricity for Inverter-Fed Induction Motors Under Standstill Conditions*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 47, No 3, 2011, pp. 1257-1266
- [9] Wiedenbrug, E. J.; Ramme, A.; Matheson, E.; von Jouanne, A.; Wallace, A. K., *Modern online testing of induction motors for predictive maintenance and monitoring*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 38, No 5, 2002., pp. 1466-1472



Mr Božo Ilić,  
Tehnički školski centar Zvornik.  
e-mail: bozoilic66@gmail.com  
Oblasti interesovanja: automatizovana dijagnostika, pouzdanost tehničkih sistema, smetnje u radu informacionih sistema uzrokovane lutajućim strujama



Prof. dr Živoslav Adamović,  
Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin.  
e-mail: zikaadamovic@gmail.com  
Oblasti interesovanja: tehnička dijagnostika, pouzdanost mašina, održavanje tehničkih sistema, hidraulika i pneumatika



Dr Branko Savić,  
Visoka tehnička škola strukovnih studija u Novom Sadu.  
e-mail: brsavic@yahoo.com  
Oblasti interesovanja: optimizacija dijagnostičkih postupaka, održavanje grafičkih mašina, pouzdanost računarskih sistema, rizik od požara