

PRIMENA NOVE GENERACIJE MIKROKONTROLERA ZA ANALIZU STANJA RADNE ISPRAVNOSTI PUMPNIH AGREGATA

Mr Miloš Milovančević
Mašinski fakultet, Niš

Milan Cvetković
Mašinski fakultet, Niš

Cilj istraživanja je kreiranje novog metoda monitoringa pumpnih agregata zasnovanog na primeni specifično realizovanog uređaja na bazi microchip-ovog mikrokontrolera. Hardver koji se koristi je 10-bitni MC poboljšan 12-bitnim AC/DC konvertorom. Softver za akviziciju i analizu podataka optimiziran je za ispitivanje turbopumpi snage do 100kW i brzine obrtana do 2000rpm. Autori su izveli veliki broj merenja na osnovu kojih su utvrđivali stanje radne ispravnosti pumpnih agregata.

Ključne reči: Mikroprocesori, vibrodijagnostika, pumpni agregat

APPLICATION OF NEW MICROCONTROLLER GENERATION FOR PUMP AGGREGATE WORKING CONDITION ANALYSES

The purpose of this research is the realization of new microcontroller based method for machine health monitoring. An attempt has been made to study the vibration level and to explore the possibility of establishing complete new PIC based hardware and software vibration diagnostic platform. Hardware platform is based on utilization of 10-bit microcontroller upgraded by 12-bit AC/DC converter. Software for acquisition and data analyses is adjusted to specific research needs rotary machines 50-300kW and 1000-2000 rpm. Custom made, microcontroller vibration monitoring system is tested in controlled laboratory environment and in exploitation environment. During exploitation period system was used to determine rotary pumps condition in Nis aqueduct system. Resultants of tests show that complete accuracy in laboratory environment and practical utilization in working environment. Microcontroller based vibro-diagnostics system is practical tool for machine health monitoring with advantage of adjusting, customizing monitoring system for certain specific requirements.

Key words: microprocessor, vibro-diagnostics, pump aggregate

UVOD

Razvoj neinvazivnih metoda monitoringa, omogućio je prelaz sa preventivnog na prediktivno održavanje. Postoje različiti indikatori stanja mašine (temperatura, pritisak,...) ipak vibracije su se pokazale kao najbolji metod, za utvrđivanje radnog stanja mašine [8]. Kako se

monitoring zasnovan na vibracijama koristi u velikom broju slučajeva utvrđivanja radnog stanja mašina, kreiran je monitoring sistem zasnovan na MC. Sistem je kreiran tako da ispunji određene zahteve: monitoring platforma zasnovana na korišćenju PC-računara, niska cena uređaja, mobilnost, 12-bitna rezolucija, primena na rotacionim mašinama snage do 100kW.

Kontakt: mr Miloš Milovančević, dipl. inž.
Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet
Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš
E-mail : milovancevic@masfak.ni.ac.yu

PRIMENA MC U MONITORINGU

Mikrokontroleri su elektronske komponente namijenjene konstruisanju elektronskih sistema za digitalno upravljanje i nadzor. Pomoću takvih sistema moguće je upravljati različitim elektronskim uređajima i sistemima, a takođe vršiti i prikupljanje i obradu različitih električnih i neelektričnih veličina. Digitalni sistemi zasnovani na mikrokontrolerima mogu se programirati da u zavisnosti od stanja upravljanog kola izvršavaju određene obrade i na osnovu rezultata tih obrada vrše upravljanja u kolu.

Na početku je veoma važno napomenuti koje su razlike između mikrokontrolera i mikroprocesora. Mikroprocesori su elektronske komponente koje su namijenjene različitim vrstama obrade u digitalnim računarima. Da bi se mikroprocesor mogao koristiti u sistemima digitalnog upravljanja, potrebno ga je povezati sa komponentama za memorisanje programa za obradu i podataka nad kojima se ta obrada izvodi, kao i sa komponentama za interakciju sa spoljnim svijetom - ulaznim i izlaznim uređajima. Na taj način se dobija digitalni sklop koji je dosta složen i glomazan, te je stoga i dosta skup.

Za razliku od mikroprocesora, mikrokontroleri su projektovani tako da objedine kompletan digitalni računar na jednom čipu, jer osim procesora sadrže i memorijske i periferne jedinice. Tako se postiže da željeni sistem ima minimalan broj komponentata, čime se štedi prostor i vrijeme potrebno za konstruisanje uređaja.

U sadašnje vrijeme na tržištu postoji nekoliko velikih proizvođača mikrokontrolera koji u svom proizvodnom programu imaju najrazličitije familije mikrokontrolera. Najpoznatiji od njih su Intel, Motorola, Atmel i Microchip. Primjene mikrokontrolera su veoma široke, što je posljedica njihove osobine da sami zavisno od željene namjene možemo da isprogramiramo kakvo će biti ponašanje digitalnog uređaja koji projektujemo [1].

U želji da se utvrdi analiza radnog stanja pumpnih agregata autori ovog rada su projektovali posebno MC razvojno okruženje čiji opis dajemo u skraćenom obliku.

Opis uređaja

Uređaj je realizovan na bazi Microchip-ovog mikrokontrolera PIC16F877A (20MHz) za RS 232 verziju ili na bazi PIC18F4550 ukoliko je potrebna USB varijanta. Dodatna pločica je 12-bit A/D konvertor sa 4 kanala na bazi MCP3204

AD konvertora. - Uređaj se na PC računar veže preko USB ili RS232 (serijski) porta

- Postoji 8 analognih ulaznih kanala (opseg 0-5V i 0-200mV, mogući i drugi opsezi, svi su zaštićeni do 250V)
- Digitalni temperaturni senzor (-55 do 125)°C rezolucije 0.1 °C
- Senzor provodnosti tečnosti
- Holov senzor velike osetljivosti (-5 mT do +5 mT)
- Akcelerometar i senzor nagiba po 2 ose (x,y) opsega ±2g

Prateći softver

Prateći softver je pisan u Visual Basic-u 6. Moguće je uvećavati pojedine oblasti na grafiku, radi detaljnije analize, snimati u fajl sliku i podatke i vršiti FFT analizu merenog signala.

Program za mikrokontroler je napisan u Mikro-Basic-u.

Uređaj je testiran na Elektronskom fakultetu u Nišu pomoću signal generatora TEKTRONIX AFG3102 i to dovođenjem sinusnog signala 100Hz na sam uređaj. Nakon urađene FFT analize u softveru na PC-u, program je pokazao potpuno poklapanje sa ulaznim signalom-generatorskim.

IDENTIFIKACIJA VIBRACIONIH PARAMETARA PUMPNIH AGREGATA

U cilju obezbeđenja ispravnosti rada turbo-pumpi neophodno je obezbediti niz mera nadzora. Kao osnova nadzora smatra se nadzor prema vibracijama i njihovo merenje električnim putem. Osnovni cilj svih mera nadzora je blagovremeno prepoznavanje kritičnih stanja u radu. Vibracije su neželjene prateće pojave rada pumpi.

Rad centrifugalnih pumpi praćen je vibracijama i šumom. Nivo intenziteta vibracija i šuma karakteriše savršenstvo radnog procesa pumpe, konstrukciju u stanje pumpe za vreme eksploatacije.

Izvori vibracija centrifugalnih pumpi su: mehanički, hidraulični i električni procesi uslovljeni konstrukcijom pumpe režimom rada, eksploatacijom i tehnologijom izrade.

Neuravnoteženost obrtnih masa rotora izaziva oscilacije čija je frekvencija $f_1 = \frac{\omega}{2\pi}$, $2f_1$, $3f_1$.

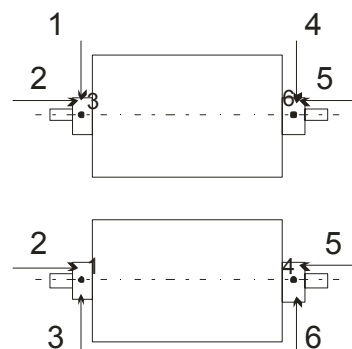
Vibracije od sudara delova u vezi nastaju u ležištima, zupčastim prenosnicima, spojnicama

i spojenim vratilima pumpe i motora. Kotrljanja ležišta stvaraju vibracije čija je frekvencija $10^2 - 10^9 \text{ Hz}$. Pri spajanju vratila pumpe i motora ozubljenom spojnicom nastaje poremećajna sila čija je frekvencia $f_2 = z_s \frac{\omega}{2\pi}$, (z_s -broj ozubljenja spojnice). Vibracije elektromotora uzrokovane su poremećajnim sila-ma, koje nastaju zbog promenljivog elektromagnetnog polja, frekvencija za taj slučaj je: $f_E = \frac{\omega}{2\pi} z_y$, (z_y -broj kanala rotora).

Mehaničke vibracije pumpe bile su predmet mnogobrojnih istraživanja [2,3,4]. Na osnovu analize rezultata može se zaključiti, da se nivo vibracija može sniziti poštovanjem određenih uputstava i preporuka pri uravnoteženju obrtnih masa, izboru ležišta, spojica, ekscentričnosti između osa vratila pumpe i motor i dr. [5, 6, 7]. Na ovo ukazuju i merenja izvršena na pumpi PEA 150-85, čiji je proizvođač fabrika pumpi „Jastrebac“ u Nišu. Pumpa je namenjena za napajanje parogeneratorske nuklearne elektrane. Pumpa je centrifugalna, horizontalna sedmostepena, sekcionog tipa. Vibracije agregata kontrolisane su prema standardima GOST 13731-68, a za sledeće parametre režima rada:

- pritisak na ulazu u pumpu 1,93 [bar]
- pritisak na izlazu iz pumpe 91,4 [bar]

- snaga pumpe 539 [KW]
- protok pumpe 150 [m³/h]
- napor pumpe 934 [m]
- brzina obrtanja 2989 [°/min]
- temperatura 305,55 [K]



Slika 1. Položaj mernih mesta

Položaj mernih tačaka dat je na slika 1, a efektivne vrednosti brzina u mernim tačkama (mm/s) u tabeli 1. Merni rezultati se odnose na vibracije elektromotora ZKV 6180/2S. Dozvoljene efektivne vrednosti brzine vibracije prema uslovima iz standarda GOST 13731-68 iznose 4,5 [mm/s]. Razlike izmerenih vrednosti (v_x , v_y , v_z) za zadate uslove ispitivanja ukazuju na veliki uticaj nivelacije postolja elektromotora čemu treba posvetiti punu pažnju kod definitivne ugradnje.

Tabela 1: Efektivne vrednosti brzina u mernim tačkama

Uslov	1(v_z)	1(v_y)	3(v_x)	4(v_z)	5(v_z)	6(v_z)
1	4,3÷5,0	3,0÷5,9	2,3÷3,2	2,0÷2,2	2,6÷2,7	0,9÷1,8
2	2,2÷2,5	3,4÷5,6	2,0÷3,5	1,3÷1,5	3,2÷4,6	2,1÷2,6
3	3,6	1,8	1,8÷1,9	4,2	1,5	2,8
4	1,6	1,8÷2,5	3,0÷3,3	2,0÷2,5	0,7÷1,1	2,3÷2,5

Tabela 2: Vibracije pumpnog agregata PEA150-85

Uslov	1	2	3	4	5	6
v_x [mm/s]		2,0÷2,2				1,7÷1,8
v_y [mm/s]			2,0÷2,2		1,4÷1,6	
v_z [mm/s]	2,4÷2,6			2,6÷2,8		

Za date parametre nominalnog rada pumpe merene su i vibracije pumpnog agregata PEA150-85 (slika 1, tabela 2). Hidrodinamičke vibracije centrifugalnih pumpi posledica su vrtloga koji nastaje u struji tečnosti, heterogenosti struje, turbulentnih pulsacija pritiska i brzine i pojave kavitacije. Pri kretanju tečnosti u protočnim kanalima pumpe dolazi do obrazovanja vrtloga zbog odvajanja struje sa

površine kanala, hidrodinamičkog traga i umicanja tečnosti kroz procepe i zaptivače. Na mestima odvajanja vrtloga od površine opstrujavanog tela opažaju se nestabilna strujanja sa relativno velikim gradijentom pritiska. Intenzitet vibracija, izazvan vrtložnim izvorima proporcionalan je šestom stepenu obimske brzine radnog kola. U velikom broju slučajeva kod centrifugalnih pumpi zajedno sa obrazovanjem vrtlo-

ga nastaju i turbulentne pulsacije. Njihovo zajedničko delovanje izaziva vibracije zidova pumpi. Polje brzine i pritiska struje tečnosti iza radnog kola heterogeno je i nestacionarno, zbog čega nastaju pulsacije hidrodinamičke sile struje na lopatice zakola i jezika spirale. Takođe postoje pulsacije hidrodinamičke sile struje na lopatice radnog kola, zbog heterogenosti struje iza ulaznog sprovednog aparata.

Vibracije koje nastaju zbog heterogenosti struje mogu se sniziti pravilnim izborom radijalnog zazora između kola i zakola. Kod centrifugalnih pumpi heterogenost struje iza radnog kola izaziva najveći nivo vibracija čija je frekvenca

$$f_z = \frac{\omega}{2\pi} z_z \quad (z_z - \text{broj lopatica radnog kola}).$$

Intenzitet tih vibracija proporcionalan je šestom stepenu obimske brzine radnog kola i ne zavisi od konstrukcije kućišta i pumpe.

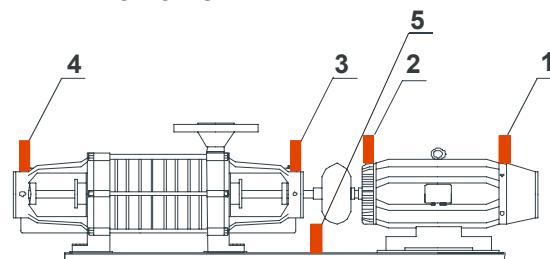
Osim merenja izvršenih kod napojne pumpe PEA 150-85, obavljeno je niz merenja pumpnih agregata sa centrifugalnim pumpama koje služe za vodosnabdevanje Niša i okoline vodom. Ispitivane su tri grupe pumpi: horizontalne višestepene, bunarske i ugradne pumpe, uz pomoć MC uređaja opisanog u poglavlju (Opis uređaja) ovog rada.

Horizontalne višestepene centrifugalne pumpe

Horizontalne pumpe imaju značajnu ulogu u transportovanju vode. Ova uloga horizontalnih pumpi definiše i značaj obezbeđivanja bezotkaznog rada. Elektro motori horizontalnih pumpi su izuzetno opterećeni sa aspekta kontinualne eksploatacije u cilju održanja neprekidnosti radnog procesa. Pravilan izbor mernih mesta na pumpnom agregatu horizontalne pumpe može da ukaže na stanje radne ispravnosti ležaja i rotora elektro-motora takodje ležaja i spojnice pumpnog agregata kao i kompletne konstrukcije agregata. Izabrana su sledeća merna mesta:

- Prva merna pozicija izabrana u cilju utvrđivanja stanja radne ispravnosti prvog ležaja na elektromotoru
- Drugo merno mesto definisano je tako da se utvrdi stanje drugog ležaja pogonskog elektromotora
- Treća merna pozicija određena je tako da je moguće utvrditi stanje prvog ležaja pumpe ali i elastične spojnice.
- Četvrto merno mesto definisano je tako da se utvrdi stanje drugog ležaja pumpe

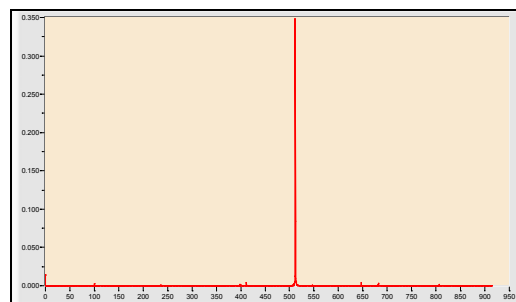
- Peto merno mesto je definisano tako da je moguće utvrditi vibracije koje se javljaju usled nelinearnog oscilovanja kompletnog pumpnog agregata.



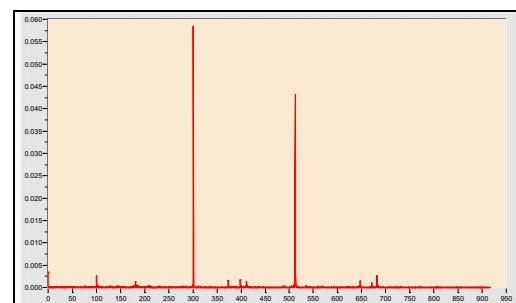
Slika 2. Merna mesta na horizontalnom pumpnom agregatu

Analiza rezultata merenja pumpnog agregata

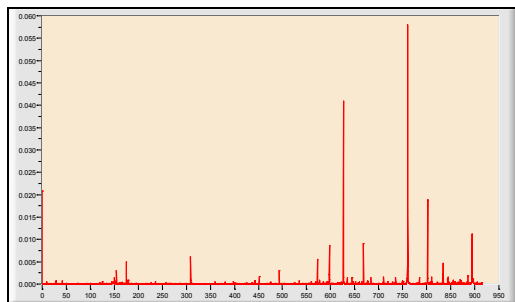
Analiza rezultata merenja izvedena je na osnovu FFT (amplitudno frekventne) dijagrama. Prikazani dijagrami nastali iz modifikovanog FFT algoritma prilagođenog dijagnostici pumpnih agregata.



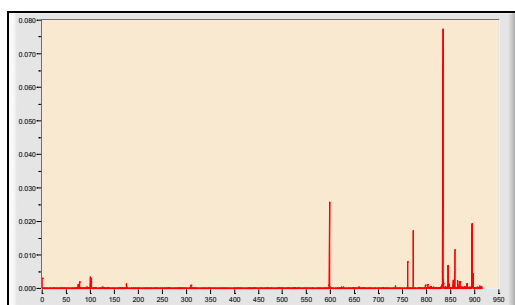
Pumpni agregat CVNR5-3 rb.1. FFT dijagram 1. Na mernom mestu 1. javlja horizontalno i vertikalno ubrzanje koje ne prelazi 1 m/s^2 što ukazuje na ispravnost ležaja.



Pumpni agregat CVNR5-3 rb.1. FFT dijagram 2. Na mernom mestu 2. iz dijagrama konstatujemo oštećenje spojnice.



Pumpni agregat CVNR5-3 rb.1. FFT dijagram 3. Na mernom mestu 3. na osnovu dijagrama konstatuje se radna ispravnost ležaja a na osnovu analize i prethodnih dijagrama dobra balansiranost vratila pumpe.

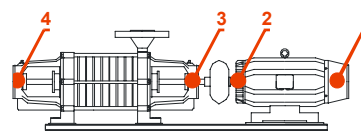


Pumpni agregat CVNR5-3 rb.1. FFT dijagram 4. Na mernom mestu 4. ukazuje na lošu učvršćenost agregata za podlogu.

INMOTESTAG PRISTUP U VIBRODIJAGNOSTICI

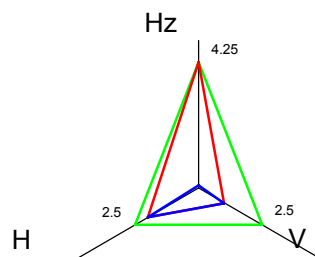
Savremeni postupak utvrđivanja stanja radne ispravnosti agregata, uglavnom se zasniva na determinističkom prikazivanju orbitala kretanja vratila. Merenja nivoa vibracija (brzina i ubrzanja) na kućištu ležaja, predstavlja osnovu za analizu radne ispravnosti agregata [9]. Ovakav pristup koji je detaljno prikazan u segmentu 3.1.1 ima fundamentalan nedostatak iz razloga što se agregat pumpa-motor sagledava iz segmenta. Takođe, opisani postupak iziskuje segmentno sagledavanje dijagrama ubrzanja odnosno frekventnih dijagrama. Sve prethodno ukazuje da se o sistemskim nedostacima agregata (poput loše centriranosti vratila motora i pumpe) zaključci mogu izvesti samo paralelnim posmatranjem svih grafika. Što iziskuje veliko iskustvo u vibrodijagnostici sistema.

Interaktivni model tehničkog stanja agregata INMOTESTAG predstavlja inovativni pristup u interpretaciji podataka dobijenih u vibro-dijagnostičkom postupku.

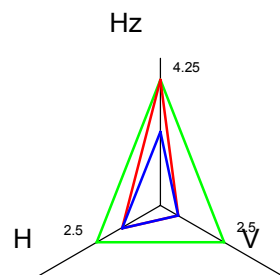


Slika 3. Šematski prikaz mernih pozicija

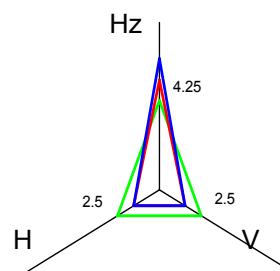
INMOTESTAG se zasniva na objedinjenom prikazivanju horizontalnih, vertikalnih amplituda i frekvencija ubrzanja na jednom dijagramu. Prikaz zahteva formiranje koordinatnog sistema sa tri ose postavljene pod uglom od 120 stepeni u ravni. Dve ose H i V prikazuju amplitude ubrzanja dok vertikalna osa pokazuje frekvencu najvećih amplituda oscilovanja. Vrednosti vertikalnih i horizontalnih ubrzanja data su u m/s^2 dok je frekvencija izražena preko koeficijenta $k_{mm} = \gamma * 1/120$.



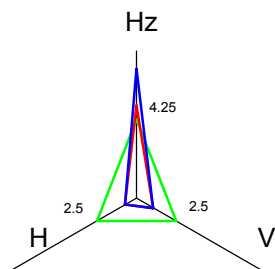
Slika 4. Grafik INMOTESTAG za mesto 1



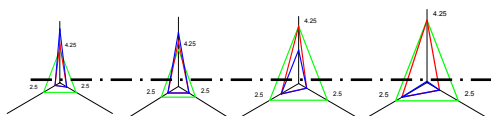
Slika 5. Grafik INMOTESTAG za mesto 2



Slika 6. Grafik INMOTESTAG za mesto 3



Slika 7. Dijagram INMOTESTAG za mesto 4



Slika 8. Grafik kompozitnog prikaza vibrodijagnostičkih parametara pumpnog agregata

Prethodno navedeni primeri predstavljaju INMOTESTAG sliku pojedinačnih mernih mesta. Zelena kontura trougla je teorijska granica radne ispravnosti pumpnog agregata u skladu sa standardom ISO 10816. Ostale konture su grafički prikaz stvarnog stanja na datom mernom mestu. Jasno se uočava defekt kada kontura stvarnog stanja izlazi iz granica konture teoretskog modela. Kompozitni INMOTESTAG prikaz predstavlja sintezu svih pojedinačnih INMOTESTAG dijagrama na osi rotacije (pumpe i agregata). Na ovaj način na jednom grafiku relativno jednostavno se predstavlja radna ispravnost celog agregata. Najveća prednost ovakvog prikaza je sažimanje svih podataka na jednom dijagramu, kao i njihovo jednostavno očitavanje. Ovaj postupak je razvijen u okviru projekta „Dijagnoza radne ispravnosti agregata“ u saradnji sa JKP „Naissus“ Niš.

ZAKLJUČAK

Ispitivanja vibracionih pojava pumpi, pružaju podatke o obimu nastalih promena radnih parametara i intenzitetu vibracija. Na osnovu dobijenih rezultata ocenjuje se stepen opasnosti po bezbednost pumpe i celog postrojenja. Uz to je najčešće potrebno utvrditi uzrok nestacionarnih pojava koje treba otkloniti ili ublažiti. U mnogim slučajevima utvrđuju se radna područja koja treba izbegavati.

Osnovni izvori vibracija centrifugalnih pumpi: mehanički, hidraulični i električni procesi uslovljeni su konstrukcijom pumpi, režimom rada, eksploatacijom i tehnologijom izrade. Mehaničke i električne izvore je moguće potpuno ili

delimično ukloniti i na taj način sniziti nivo vibracija.

Međutim hidrauličke vibracije je najteže ili nemo-guće izbeći (5,7). Hidraulični procesi koji se odigravaju u pumpama su složeni i po pravili nestacionarni. Za opisivanje tih i takvih procesa moguće je formirati matematičke modele čija se identifikacija sprovodi nakon sveobuhvatnih eksperimentalnih istraživanja koja su skupa i dugo traju.

Iz tih razloga oni u ovom radu nisu ni razmatrana, već su dati eksperimentalni rezultati dobijeni primenom novo izgrađenog uređaja za vibrodijagnostiku koji se zasniva na novoj generaciji mikrokontrolera.

U zadnjem poglavlju predstavljen je inovativni INMOTESTAG grafički prikaz vibrodijagnostičkih parametara pumpnog agregata.

LITERATURA

- /1/ N. Matić, D. Andrić, 2000 PIC mikrokontroleri, Mikroelektronika Beograd.
- /2/ Grjanko L. P., Papir A N. 1975 Lopastnie nososi, Mašinstroenie Leningrad
- /3/ D. Cvetković, D. Milenković, 1995 Vibrations of centrifugal pump aggregates, Proceedings Mechanical system and elements research and development, IRMES
- /4/ Goldam P. Muszynska A. 1999 Application of full spectrum to rotating machinery diagnostics, Orbit
- /5/ Pejović S., Gajić A., Stojanović Z., 1995 Hidraulične prelazne pojave i ekonomičnost pumpnih sistema, 21 jugoslovenski kongres teorijske i primenjene mehanike, Niš.
- /6/ Milenković D. 1988 Nestabilno strujanje kroz kola turbomašina izazvano globalnim gubitkom stabilnosti, 18. jugoslovenski kongres teorijske i primenjene mehanike, Vrnjačka Banja.
- /7/ Milovančević, M., Miltenović, A.: Virtualna ispitivanja železničkih vozila. Naučno-stručni časopis „Istraživanja i projektovanja za privredu“. ISSN 1451- 4117 UDC 33. Br.16. 2007. s.7-14.
- /8/ Milovančević, M.: Dijagnostika dinamičkog ponašanja železničkih vozila, „Istraživanje i projektovanje za privredu“ Naučno - stručni časopis „Istraživanja i projektovanja za privredu“, br. 15 – 2007, V, str. 67 - 72.