

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Alan Miletić

**DIJAGNOSTIČKE METODE I KRITERIJI ZA
OCJENU ELEKTROMEHANIČKOG STANJA
ASINKRONOG STROJA**

MAGISTARSKI RAD

Zagreb, 2002.

Magistarski rad je izrađen u Zavodu za elektrostrojarstvo i automatizaciju,
Fakultet elektrotehnike i računarstva.

Mentor: prof. dr. sc. Drago Ban

Magistarski rad ima: 82 stranice

Rad br.

Povjerenstvo za ocjenu u sastavu:

1. Prof. dr. sc. Ivan Gašparac – predsjednik
2. Prof. dr. sc. Drago Ban – mentor
3. Prof. dr. sc. Mateo Milković

Povjerenstvo za obranu u sastavu:

1. Prof. dr. sc. Ivan Gašparac – predsjednik
2. Prof. dr. sc. Drago Ban – mentor
3. Prof. dr. sc. Mateo Milković

Datum obrane: 03. 07.2002.

Zahvaljujem prof. dr. sc. Dragi Banu na pomoći prilikom odabira teme kao i vođenju tijekom izrade rada.

Mirku Cettolu, dipl. inž. zahvaljujem na nesebičnoj pomoći i savjetima u provedbi mjerenja.

Hvala mr. sc. Milutinu Pavlici i svim ostalim djelatnicima zavoda na ohrabrivanju.

Na kraju, hvala mami, tati i Sandri na razumijevanju i strpljivosti.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. TIPIČNI KVAROVI ELEKTRIČNIH MOTORA	2
2.1. Mehanički kvarovi	3
2.2. Kvarovi paketa statora	3
2.3. Kvarovi paketa rotora	3
2.4. Oštećenja izolacije namota	4
2.5. Kvarovi rotorskih namota	5
3. NADZOR I DIJAGNOSTIKA ELEKTRIČNIH STROJEVA	7
3.1. Uloga dijagnostike	7
3.2. Zahtjevi na sustav dijagnostike	9
3.3. Dijelovi dijagnostičkog sustava	9
3.3.1. Mjerenje i pretvorba veličina	10
3.3.1.1. Mjerenje temperature	10
3.3.1.2. Termovizijska dijagnostika	11
3.3.1.3. Mjerenje vibracija	12
3.3.1.4. Mjerenje struje	13
3.3.2. Prikupljanje podataka	13
3.3.3. Obrada podataka	14
3.3.4. Dijagnostika	17
4. ROTORSKI KVAROVI ASINKRONIH MOTORA I METODE DIJAGNOSTIKE... ..	18
4.1. Metode dijagnostike rotorskih kvarova asinkronog stroja	21
4.1.1. Vizualni pregled stroja	22
4.1.2. Primjena penetranata	22
4.1.3. Provjera ultrazvukom	23
4.1.4. Mjerenje otpora štapova i prstena	23
4.1.5. Kontrola rotacijom pri jednofaznom napajanju	24
4.1.6. Promatranje titranja kazaljki ampermetara	24
4.1.7. Analiza vibracija	24
4.1.8. Snimanje aksijalnog rasipnog toka	24
4.1.9. Analiza osovinskih struja i napona	27
4.1.10. Snimanje rotorske struje	27
4.1.11. Analiza razvijenog momenta i brzine vrtnje	28
5. SPEKTRALNA ANALIZA STATORSKE STRUJE	29
5.1. Spektralna analiza statorske struje	29
5.2. Detekcija kvarova ležajeva	30
5.3. Detekcija kvarova statorskog namota	31
5.4. Detekcija rotorskog ekscentriciteta analizom statorske struje	31
5.5. Detekcija kvarova rotorskog kaveza analizom spektra statorske struje	33
6. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA	37
6.1. Sustav za ispitivanje	37
6.1.1. A/D kartica – DAS 50	37
6.1.2. Programski paket TestPoint	38

6.1.3. Lista objekata upotrijebljenih u izradi aplikacija.....	42
6.1.4. Opis razvijene aplikacije za snimanje i analizu statorske struje.....	45
6.2. Podešavanje izrađene aplikacije	52
6.3. Ispitivani stroj	56
6.4. Ispitivanje asinkronog stroja 22 kW za različite kvarove kaveza.....	59
6.4.1. Rad na krutoj mreži	60
6.4.2. Rad na frekvencijskom pretvaraču	65
6.4.2.1. Frekvencijski pretvarač.....	65
6.4.2.2. Snimanje stroja napajanog iz frekvencijskog pretvarača.....	66
6.5. Mjerenje napona osovine	70
6.6. Analiza rasipnog polja stroja	73
6.6.1. Korištenje ispitnog svitka na kućištu stroja	73
6.6.2. Rezultati mjerenja rasipnog toka	74
6.7. Programski paket Motormonitor.....	79
7. PRIMJERI IZ STVARNIH POGONA	80
8. ZAKLJUČAK	81
9. LITERATURA.....	83
10. POPIS KORIŠTENIH OZNAKA	86
11. SAŽETAK.....	88
12. ABSTRACT	89
13. ŽIVOTOPIS	90
PRILOG A-1	91
PRILOG A-2	95
PRILOG B.....	101
PRILOG C.....	121
PRILOG D.....	137
PRILOG E.....	141
PRILOG F	143
PRILOG G.....	146

1. UVOD

Trofazni asinkroni motori po broju ugrađenih jedinica, danas premašuju sve ostale vrste električnih motora. Zahvaljujući intenzivnom razvitku i primjeni frekvencijskih pretvarača, asinkroni stroj se, i po upravljačkim karakteristikama, približio istosmjernim strojevima, te ga je moguće koristiti i u vrlo zahtjevnim pogonima. Neočekivana pojava kvara i ispad nekog stroja iz pogona može prouzročiti velike materijalne troškove i zastoje procesa različite vrste. Primjenom adekvatnih dijagnostičkih metoda, kvarove možemo otkriti na vrijeme, odnosno u ranoj fazi njihova nastanka. U tom slučaju, izmjene motora vršimo u tehnološki najpogodnijem trenutku, a planiranja remonta i nabavke rezervnih dijelova su olakšana. Svi ti podaci korisni su kako za korisnika tako i za proizvođača opreme.

Današnja je tendencija korištenje metoda "*on-line*", to jest onih koje ne zahtijevaju zaustavljanje pogona. Da bi dijagnostičke metode bile učinkovite, neophodno je odabrati električne veličine iz kojih će se dobiti najviše podataka za dijagnostiku kvara.

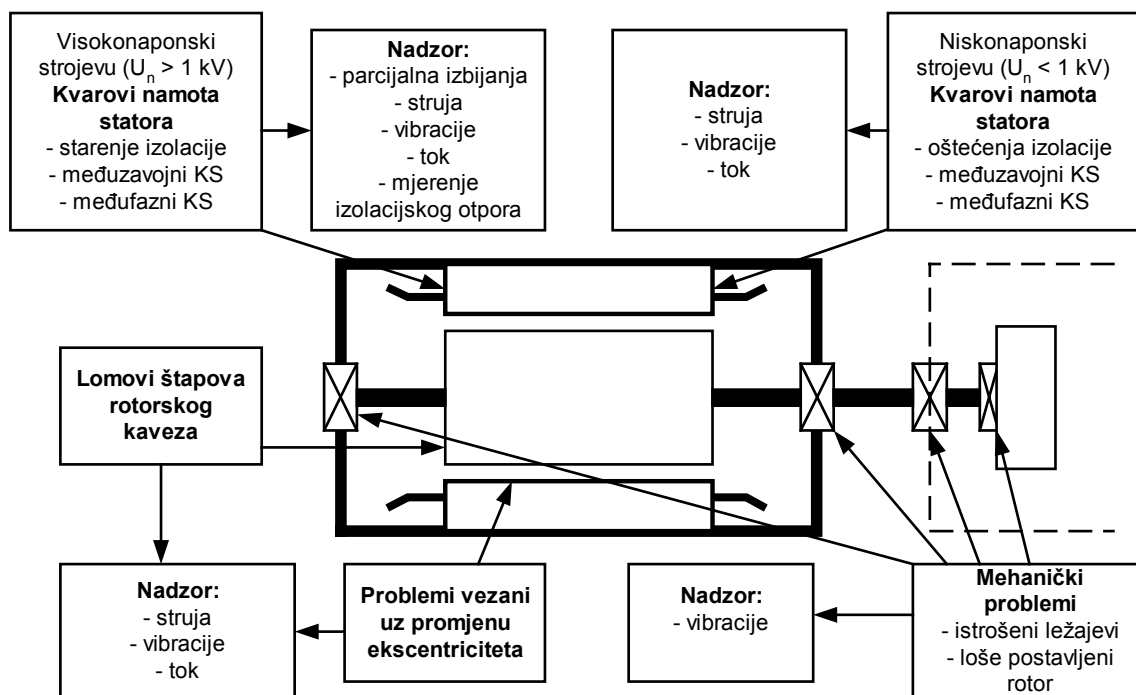
U najnovije vrijeme suvremene se dijagnostičke metode uvode i u proizvodne linije strojeva, kao dodatni segment završne kontrole [3].

Dijagnostika električnih strojeva je u svjetskoj tehničkoj praksi područje koje se vrlo intenzivno razvija. U literaturi se spominju različite metode kojima je moguće ustanoviti čitav niz kvarova električnih strojeva. Mnogi vanjski pokazatelji, poput njihanja kazaljki ampermetara, oscilacija brzine vrtnje ili povećanih vibracija, mogu ukazivati na nepravilnosti u radu električnih strojeva. Za pouzdanu dijagnostiku kvarova neophodno je razvijati točne algoritme obrade i promatranja signala, kako bi se iz dobivenih podataka mogao ustanoviti uzrok. Zbog toga je vrlo važno poznavati ponašanje ispravnog stroja u radu.

U sklopu ovog rada težište je stavljeno na dijagnostiku kvarova rotora kaveznih asinkronih motora. Pored pogonskih ispitivanja, u stvarnim "*on-line*" uvjetima, provedena su i laboratorijska ispitivanja stroja s različitim, namjerno izazvanim, oštećenjima rotorskog kaveza, u radu na krutoj mreži i na frekvencijskom pretvaraču, pri različitim opterećenjima. Eksperimentalna istraživanja su provedena spektralnom analizom statorsche struje, te snimanjem osovinskog napona i rasipnog toka, kako bi se usporedila efikasnost pojedinih metoda.

2. TIPIČNI KVAROVI ELEKTRIČNIH MOTORA

Pregled najčešćih kvarova koji se pojavljuju tijekom eksploatacije električnih strojeva, te mogući načini dijagnostike istih [24] prikazan je na slici 2-1.



Sl. 2-1 Pregled kvarova i metoda dijagnostike strojeva

Mnogi od kvarova na električnim strojevima pojavljuju se zbog neadekvatnog odabira stroja za određeni pogon. Pri tome se misli na odabir strojeva nedovoljne snage ili strojeva sa neodgovarajućom zaštitom. U uvjetima povišene temperature na primjer, dobro je odabrati stroj većih dimenzija od neophodnih i time smanjiti zagrijanje samog stroja u radu. U mnogim je slučajevima jednostavnije i jeftinije zamijeniti neodgovarajući stroj novim, nego ulagati velika sredstva u opremu za dijagnostiku i otkrivanje kvarova. S druge strane, u nekim slučajevima je zbog prirode postrojenja neophodno da stroj nastavi sa radom i u slučajevima manjih kvarova ili odstupanja parametara od nazivnih. Kod takvih je slučajeva kvalitetna dijagnostika od vitalne važnosti.

Da bi se pojavljivanje kvarova smanjilo na najmanju moguću mjeru, već je u fazi odabira stroja neophodno poznavati uvjete u kojima će se stroj nalaziti i raditi. Isto tako vrlo je važno kvalitetno odabrati veličine koje će se nadzirati i koristiti u dijagnostičke svrhe.

Kao najčešći uzroci kvarova asinkronih strojeva pojavljuju se: mogućnost pojave ekscentriciteta, nepravilnosti rotorskog kaveza, velike struje i sile pri pokretanjima, te

problemi učvršćenja statorskih namota [1]. Mehanički i električki gledano, u radu stroja najteža su prijelazna stanja. Za vrijeme pokretanja ili u intermitiranim radu, stroj je izložen povećanim električkim, termičkim i mehaničkim naprezanjima. Upravo su to trenuci najčešćeg nastanka kvarova.

2.1. Mehanički kvarovi

Tijekom rada električni je stroj izložen velikim mehaničkim naprezanjima. Dijelovi posebno izloženi mehaničkim naprezanjima su ležajevi, spojke te ostali dijelovi prijenosnog mehanizma. Neki od uobičajenih mehaničkih problema koji se susreću u asinkronim strojevima su na primjer [24]:

- istrošenost i kvarovi ležajeva,
- mehanička neuravnoteženost,
- oštećenja prijenosnog mehanizma,
- vibracije na rezonantnim frekvencijama.

2.2. Kvarovi paketa statora

Kvarovi paketa statora javljaju se relativno rijetko i zabilježeni su uglavnom kod velikih jedinica. Problemi se pojavljuju kada među limovima lameliranog jarma dođe do spoja. Takve se greške javljaju tijekom proizvodnje ili prilikom ubacivanja rotora u stator. Na mjestu na kojem se pojavio spoj, javljaju se struje koje pojačano zagrijevaju oštećeno mjesto. U slučaju dovoljno velikih struja ili njihovog trajanja, oštećeno se mjesto zagrijava i, u ekstremnim slučajevima, može doći do otapanja materijala i njegovog otjecanja u prostor namota, gdje dolazi do oštećenja izolacije i kratkih spojeva. Kod manjih jedinica, ovakvi se kvarovi češće javljaju kao posljedica vibracija ili oštećenja ležajeva uslijed čega dolazi do zapinjanja rotora o stator. Rani su pokazatelji ovih kvarova velike vrtložne struje, lokalna zagrijavanja i oštećenja izolacije vodiča. Opširnije se o kvarovima statora može pronaći u [14].

2.3. Kvarovi paketa rotora

Zbog postojanja velikih centrifugalnih sila, velikim naprezanjima izloženi su ne samo namoti već i paket rotora. Mala površinska oštećenja (napuknuća) mogu se vrlo brzo proširiti u slučajevima teških pogonskih režima rada. Isto tako na slabljenje materijala utječe i zagrijavanje rotora.

Osim centrifugalnih sila, mehanička naprezanja uzrokuju i prijelazne pojave kojima je stroj izložen tijekom rada. U slučajevima kada dođe do pojave rezonancije između stroja i

sustava, mogu se pojaviti velike torzijske oscilacije. Ova pojava može uzrokovati oštećenje rotora i ostalih dijelova povezanih na osovinu, poput spojki.

Pojave ekscentriciteta mogu također dovesti do oštećenja rotorskog i statorskog paketa.

Rani pokazatelji ovih kvarova su povećane vibracije u ležajevima, a u novije vrijeme mjere se i torzijske oscilacije osovine.

2.4. Oštećenja izolacije namota

Izolacija je jedan od najosjetljivijih dijelova električnog stroja i, posebice nekad, kvarovi uslijed oštećenja i propadanja izolacije bili su vrlo česti. Moderne metode izoliranja, kao i najnoviji izolacijski materijali, poboljšali su mehaničke i izolacijske karakteristike.

Rad na povišenim temperaturama, osjetno skraćuje životni vijek izolacije. Očekivana životna dob na povišenoj temperaturi dana je izrazom 2-1 [4]

$$\check{Z}' = \frac{\check{Z}}{2^{\frac{\vartheta - \vartheta_0}{\Delta}}} \quad (2-1)$$

gdje je: $\check{Z}$ - životna dob na nazivnoj temperaturi

$\check{Z}'$ - životna dob na povišenoj temperaturi

ϑ - radna temperatura

ϑ_0 - dozvoljena nadtemperatura za određenu klasu izolacije

Δ - iznos stupnjeva koji skraćuje životni vijek na pola (8-12 °C)

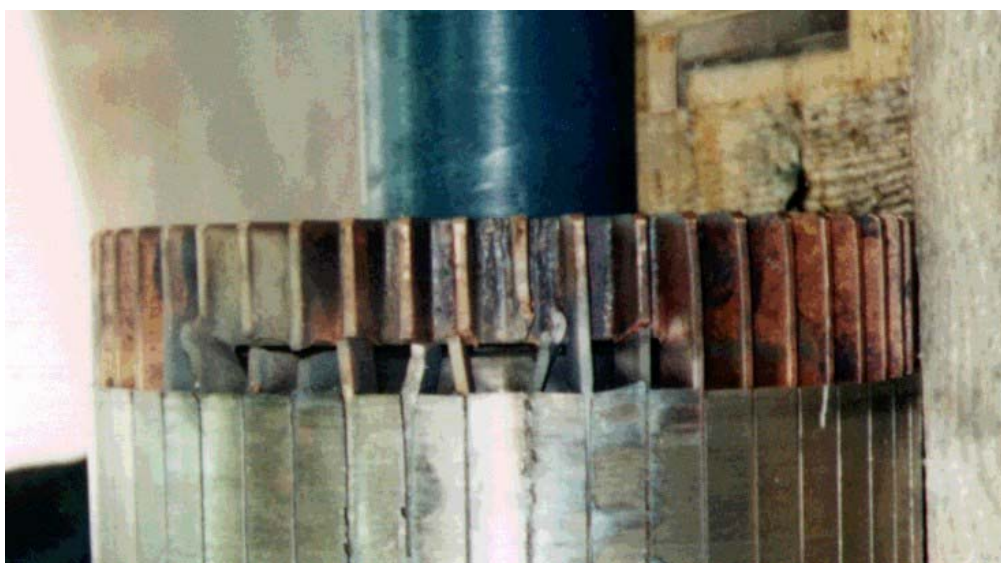
Ipak kvarovi velikih strojeva nastali isključivo zbog starenja izolacije, relativno su rijetki. Puno su češći kvarovi nastali prodorom stranih materijala (ulja, metali....) u izolaciju. U pogonu se ponekada javljaju i oštećenja izolacije izvoda faza iz stroja, koja nastaju uslijed vibracija. Iz tih je razloga neophodno u redovita dijagnostička ispitivanja uključiti i ispitivanja izolacije. Osnovne metode ispitivanja stanja izolacije su [5]:

- ispitivanje niskim istosmjernim naponom (mjerenje izolacijskog otpora i faktora polarizacije),
- ispitivanje visokim istosmjernim naponom, mjerenje struje oticanja,
- mjerenja faktora dielektričkih gubitaka ($\text{tg}\delta$),
- mjerenje kapaciteta,
- mjerenje parcijalnih izbijanja i
- ispitivanje dielektrične čvrstoće visokim izmjeničnim naponom.
- ispitivanje impulsnim naponima

Da bi dobiveni rezultati bili relevantni, vrlo je važno sve dobivene rezultate preračunati na istu temperaturu.

2.5. Kvarovi rotorskih namota

Kvarovi su rotorskog namota asinkronog stroja, u pogonskim uvjetima, dugo vremena bili složeni za otkrivanje. Za to postoji više razloga. Kao prvo, u slučaju kaveznog asinkronog motora ne može se fizički pristupiti rotorskom kavezu. Osim toga, u rotorskom se namotu induciraju struje niske frekvencije (frekvencija rotorskih struja ovisi o klizanju $f_2 = s \cdot f_1$) koje je teško mjeriti. Kvarovi kaveza rotora pojavljuju se posebno kod većih strojeva. Najčešći su razlozi visoke temperature koje se razvijaju u kavezu i velike sile kojima je rotor izložen, posebice tijekom zaleta. Uzroci kvara kod lijevanih rotora mogu biti u nekvalitetnoj izradi kaveza, dok kod rotora sa navarenim prstenima ponekada postoje loši spojevi štapa i prstena. U tim slučajevima mjesto greške se povećano zagrijava što ga dodatno oslabljuje i na kraju dolazi do puknuća. Mjesta najčešćih pucanja upravo su spojevi prstena i štapova, kao i dijelovi štapova izvan rotorskog paketa koji su slobodni. Slični se kvarovi mogu javiti i kao posljedica malih pomaka kaveza unutar paketa, koji se javljaju zbog naizmjeničnih grijanja i hlađenja rotora. U slučajevima intermitiranog rada, kada je stroj izložen velikim promjenama brzine ili učestalim pokretanjima, postoji opasnost nastanka kvarova uslijed zamora materijala. Rani pokazatelji ovih kvarova su pulsacije u brzini vrtnje, statorskoj struji i rasipnim tokovima stroja. Primjer totalnog kvara rotorskog kaveza jednog visokonaponskog motora vidi se na slici 2-2



Sl. 2-2 Primjer totalnog kvara rotorskog kaveza

Kod rotora sa kliznim kolutima najugroženije su glave namota. Da bi se smanjila opterećenja glave namota učvršćuju su čeličnim prstenima ili staklenim vlaknima. Ponekada se problemi javljaju i uslijed nesimetrije vanjskih otpora. Takva nesimetrija uzrokuje nesimetrične struje faza što dovodi do nejednolikog zagrijanja faza. Ovaj je problem teško detektirati zbog malih razlika u strujama i niske frekvencije istih.

Opširnije o kvarovima rotora asinkronih motora dano je u poglavlju 4.

3. NADZOR I DIJAGNOSTIKA ELEKTRIČNIH STROJEVA

3.1. Uloga dijagnostike

Dijagnostika je pravovremeno ili periodičko određivanje stanja nekog stroja s ciljem procjene pouzdanosti daljnjeg pogona i predlaganja načina i obima servisiranja [6]. Uloga je dijagnostike otkrivanje kvarova stroja ili pojedinih njegovih dijelova u najranijoj mogućoj fazi. Nadzorom stanja strojeva, olakšava se planiranje održavanja i popravaka, čime se vrijeme zastoja pogona nastalo zbog zamjene i popravaka strojeva, svodi na najmanju moguću mjeru. U slučajevima kada se nadzor kvalitetno provodi, izbjegnuta su mnoga nepotrebna zaustavljanja pogona. Osnova je dijagnostike usporedba stvarnih i željenih ponašanja odnosno parametara stroja. Osim teorijskih znanja vrlo je korisno i iskustveno poznavanje ponašanja stroja u pojedinim kvarnim režimima. U tablici 3-1 su definirani osnovni pojmovi, nazivlje i definicije [3], [6]:

Tablica 3-1 Osnovni pojmovi, nazivlje i definicije

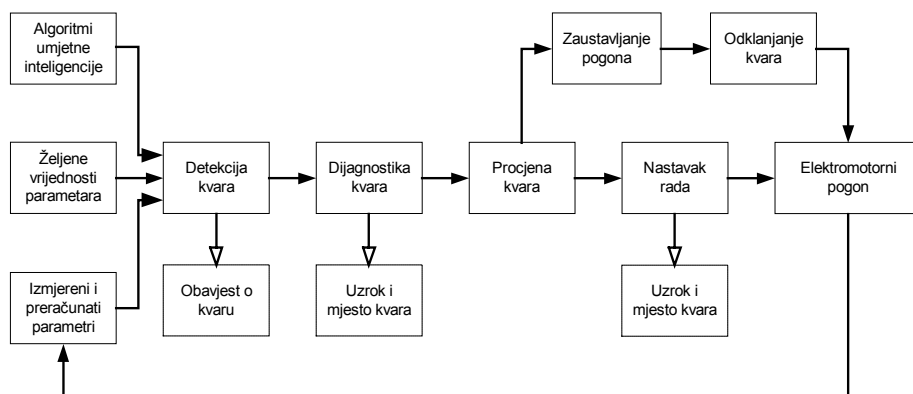
Kvar (engl. <i>Failure</i>)	Uzrok odstupanja od nazivnog rada. Posljedica je kvara nedozvoljena promjena parametara zbog koje je onemogućen pravilan rad pogona. U težim slučajevima uzrokuje trajni prestanak sposobnosti pogona za obavljanje željene funkcije pod zadanim parametrima
Praćenje stanja (engl. <i>Condition Monitoring</i>)	Periodičko ili neprekidno (on-line) nadgledanje rada pogona u cilju otkrivanja stanja pogona. Obuhvaća prikupljanje, obradu i analizu pojedinih veličina iz kojih se mogu dobiti informacije o stanju sustava.
Održavanje (engl. <i>Maintenance</i>)	Kombinacija tehničkih i administrativnih radnji poduzetih u svrhu da se neko postrojenje održi ili vrati u stanje u kojem može ispunjavati traženu funkciju.
Preventivno održavanje (engl. <i>Preventive maintenance</i>)	Održavanje koje se provodi prema unaprijed određenim intervalima ili odgovarajućim propisanim kriterijima, u svrhu smanjenja vjerojatnosti kvara ili degradacije svojstava. Provodi se planski prema utvrđenim terminima
Dijagnostika (engl. <i>Diagnostics</i>)	Određivanje stanja nekog postrojenja. Određivanje uzroka odstupanja njegovih parametara od nazivnih, te na osnovu iskustava i znanja određivanje mjesta pogreške (kvara)
Nadgledanja (engl. <i>Supervision</i>)	Aktivnosti koje se vrše ručno ili automatski u cilju određivanja stanja nekog postrojenja.
Ekspertiza (engl. <i>Expertise</i>)	Ocjena stanja i davanje mišljenja i preporuka za zamjenu, popravak, reviziju ili revitalizaciju dijelova postrojenja ili strojeva, Temelji se na znanjima specijalista za pojedine tehničke discipline, a na osnovu provedenih dijagnostičkih ispitivanja

Današnji su elektromotorni pogoni često upravljani putem računala. Da bi se upravljanje uspješno realiziralo u pogone su ugrađeni različiti senzori: senzori toka, brzine, indukcije, pozicije, napona i slično, čiji se signali koriste kao upravljačke i regulacijske veličine. Iste veličine mogu se koristiti i u dijagnostičke svrhe, bez potrebe za ugradnjom novih. Moderni dijagnostički sustavi nastoje polaziti upravo od tih postavki.

Kvalitetan nadzor i dijagnostika zahtijeva promatranje i obradu niza električnih veličina. Mnogi od tih zadataka danas se rješavaju uporabom računala. Slika 3-1 prikazuje blok shemu modernog računalom upravljanog elektromotornog pogona sa ugrađenom dijagnostikom [3]. U automatiziranom dijagnostičkom sustavu, za kvalitetnu su dijagnostiku najznačajniji blokovi "Simulirane vrijednosti parametara" i "Algoritmi umjetne inteligencije". Simulirane vrijednosti parametara dobivene su iz matematičkih modela, teoretskih znanja i provedenih simulacija. Te vrijednosti predstavljaju parametre koje sustav mora zadovoljavati u ispravnom radu. Algoritmi umjetne inteligencije određuju metode kojima će se uz pomoć ekspertnog sustava, te izmjerenih i unaprijed proračunatih veličina detektirati pojava nekog kvara..

Na slici 3-1 vidljiv je proces dijagnostike, raščlanjen na dijelove. Veličine koje su značajne za rad sustava neprestano se mjere. Izmjerene veličine preračunavaju se na veličine koje se odvoje u računalu i uspoređuju sa simuliranim vrijednostima. U normalnom radu te veličine razlikuju se unutar nekih dozvoljenih, unaprijed određenih granica. Kada odstupanje izađe izvan dozvoljenih granica, sustav upozorava o mogućoj pojavi kvara. Uz pomoć ekspertnog sustava se, na osnovu stvarnog ponašanja sustava, donosi zaključak o mogućem mjestu i uzroku kvara (dijagnostika). Proces dijagnostike kvara vrlo je zahtjevan budući se različiti kvarovi mogu jednako manifestirati, odnosno odraziti na rad pogona. Dijagnosticirani se kvar procjenjuje i na temelju procjene donosi se odluka o nastavku ili prekidu rada pogona. U slučajevima kada je odstupanje malo i kada ne postoji opasnost od većih oštećenja, pogon nastavlja sa radom, a dobiveni se podaci koriste za planiranje remonta i nabavku rezervnih dijelova. Kod većih odstupanja planira se remont u najkraćem mogućem roku. U slučaju vrlo velikih odstupanja, odnosno kvarova koji su opasni za dalji rad, pogon se zaustavlja i kvar se otklanja.

U slučajevima kada dijagnostički sustav nije u potpunosti automatiziran, neke od ovih zadataka obavlja čovjek. Vrlo često je to upravo dijagnosticiranje stanja iz prikupljenih podataka ili upravljanje postupkom mjerenja.



Sl. 3-1 Blok shema računalom upravljanog dijagnostičkog sustava elektromotornog pogona

3.2. Zahtjevi na sustav dijagnostike

Da bi dijagnostički sustav uspješno obavljao zadaću treba zadovoljiti slijedeće uvjete [3]:

- pouzdanost - signal koji se analizira mora sadržavati informaciju iz koje se pouzdano može dijagnosticirati kvar
- jednostavnost – ne smije ometati normalni rad pogona niti zahtijevati namještanje dodatnih senzora ili mjerača na nedostupna mjesta
- cijena – po mogućnosti za dijagnostiku koristiti veličine koje se već koriste za upravljanje pogonom
- mogućnost automatizacije procesa bez potrebe za operaterom

Moderne dijagnostičke metode i sve šira uporaba računala omogućile su korištenje dijagnostike u sve većem broju pogona. Osim toga za dijagnostičke se svrhe koristi sve veći broj električnih veličina (prije su se koristile uglavnom termičke metode i mjerenja vibracija). Današnje su tendencije da se dijagnostički sustav, zasnovan na nekoj od metoda umjetne inteligencije (ekspertni sustavi, neuronske mreže, neizrazita logika, genetički algoritmi), ugradi kao standardna komponenta elektromotornog pogona.

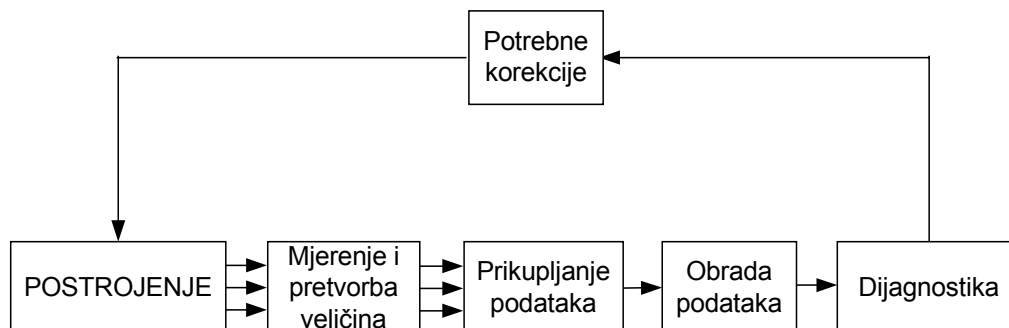
3.3. Dijelovi dijagnostičkog sustava

Dijagnostika stanja nekog procesa ili sustava složen je i zahtjevan zadatak. Čitavi se proces može ilustrirati prema slici 3-2.

Karakteristične su faze rada u takvom procesu [1]:

- mjerenje karakterističnih veličina i pretvorba
- prikupljanje podataka
- obrada podataka
- dijagnostika

Cijeli proces može biti potpuno automatiziran, no neki njegov dio može djelomično ili u potpunosti obavljati čovjek. Svaki je dio procesa za sebe često vrlo složen zadatak i za uspješnu je dijagnostiku vrlo važno da se kvalitetno riješi svaki od njih.



Sl. 3-2 Faze dijagnostičkog sustava

3.3.1. Mjerenje i pretvorba veličina

Za dijagnostičke je svrhe neophodno odabrati odgovarajuće mehaničke ili električne veličine, na osnovu kojih se može dobiti najpouzdanija informacija o objektu kojega obrađujemo. U tu se svrhu u stroj, odnosno pogon, ugrađuju različiti senzori, koji uzimaju uzorak neke veličine, te ga prema potrebi pretvaraju u drugu npr. brzina u napon. Neka od najvažnijih mjerenja i senzori za dijagnostiku stanja su ukratko opisani u nastavku.

3.3.1.1. Mjerenje temperature

Mjerenje temperature je uobičajena metoda nadzora stanja električnih strojeva i pogona od pregrijavanja. Trajnim mjerenjem temperature mogu se spriječiti oštećenja statorskih namota i paketa, rotorskih namota i paketa, kao i oštećenja ležajeva (najčešće kombinirano sa mjerenjem vibracija). Za mjerenje temperature kontinuirano ili povremeno koriste se senzori u izvedbi:

- termistora
- termoelementa,
- otpornih termometara.

Termoelementi – rad se bazira na činjenici da kada se dva različita metala spoje na jednom kraju, i spoj se nalazi na različitoj temperaturi od slobodnih krajeva, na krajevima ta dva metala se inducira napon. Iznos induciranog napona proporcionalan je razlici tih dviju temperatura. Pri mjerenju je važno da mjerena temperatura sigurno dođe na mjesto spoja obiju žica, te se stoga vrlo često ugrađuju na pločice koje se ubacuju u stroj u npr. ventilacijske

kanale. Termoelementi mjere temperature od $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$, ovisno o korištenim materijalima. Najčešće su korišteni [1]:

bakar/konstantan	-250 do $400\text{ }^{\circ}\text{C}$
željezo/konstantan	-200 do $850\text{ }^{\circ}\text{C}$
kromel/alumel	-200 do $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$
platina/platinorodij	0 do $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$

Iznos induciranog napona ovisi, osim o temperaturi, i o korištenom termoelementu.

Otporni termometri – elementi kojima se iz promjene otpora određuje temperatura. Imaju pozitivni temperaturni koeficijent otpora i dobru stabilnost. To su posebno izrađeni žičani otpornici koji se ugrađuju na neko karakteristično mjesto u stroju sa svrhom da se na tom mjestu može mjeriti temperatura. Za izradu se koriste slitine s velikim temperaturnim koeficijentom npr. platina, nikal. To je najčešće Pt 100, otpornik koji ima otpor $100\text{ }\Omega$ na $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vrlo je važno da mjerna struja bude malena jer se u protivnom u mjerачu razvijaju preveliki Jouleovi gubici, koji ga zagrijevaju i izobličavaju rezultate mjerenja.

Promjene otpora zbog promjene temperature se prenose u oblik promjene struje zaštitnog kruga. Zbog toga je potrebno imati izvor električne snage za mjerenje temperature. Karakteristike promjene otpora s promjenom temperature specificirane su u DIN IEC 751 normi.

Otporni termometri su za dijagnostičke svrhe bolji od termoelemenata zbog malih vrijednosti napona koji se induciraju na termoelementu. Taj se napon za mjerne uređaje treba povećati što, ponekad, unosi netočnost.

Termistori – rade na istom principu kao i otporni termometri ali imaju daleko veće promjene otpora sa temperaturom. Izrađeni su od keramičkih poluvodiča (na bazi kobalta, nikla, titana). Prednosti su im stabilnost, brzi odziv i male dimenzije. Nedostaci su ograničenost do temperatura oko $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ i izrazito nelinearne karakteristike, koje je potrebno elektronički kompenzirati. Na određenoj temperaturi neki imaju naglu promjenu otpora pa se koriste u zaštitnim relejima i sklopnim uređajima. Mogu biti izvedeni u malim dimenzijama (promjer oko 0.25 mm i manje).

3.3.1.2. Termovizijska dijagnostika

Metoda se zasniva na snimanju dijelova pogona specijalnim termovizijskim kamerama. Termovizijska kamera snima u infracrvenom području, te temperature snimanih površina prikazuje različitim bojama. Starije su izvedbe hladene tekućim dušikom glomazne, pa su

snimanja ograničena na vanjska postrojenja. Novije digitalne izvedbe rade na sobnoj temperaturi, malih su dimenzija, te omogućavaju i snimanje unutar kućišta stroja. U dijagnostičkom se smislu metoda može ocijeniti kao srednje efikasna zbog ograničenosti na vidljive dijelove. Daje dobre rezultate u otkrivanju pregrijanja na spojnim mjestima, osiguračima, sabirnicama, provodnim izolatorima (loš kontakt) i kućištima (pregrijanja zbog lutajućih struja, koncentracije magnetskog toka ili specifičnih problema vezanih za izvode protjecane velikim strujama).

Mjerenja je najbolje provesti pri slaboj vidljivosti (noću ili danju uz oblačno vrijeme). Tijekom mjerenja ispitivani dijelovi sustava trebaju biti opterećeni barem s 50% nazivnih vrijednosti struja, kako bi se smanjile moguće greške zbog preračunavanja struja na nazivno opterećenje.

Pri mjerenjima je potrebno uzeti u obzir da, ovisno o položaju izvora topline, temperature u unutrašnjosti mogu biti znatno više nego na površini.

Metoda se, na području elektrotehnike, u početku koristila prvenstveno za dijagnostiku vanjskih rasklopnih postrojenja, vodova i dalekovoda, no danas nailazi na sve širu primjenu.

3.3.1.3.Mjerenje vibracija

Veliki dio kvarova električnih strojeva popraćen je i povećanjem vibracija stroja ili pojedinih njegovih dijelova. U slučaju mnogih nepravilnosti vibracije mogu biti pouzdani pokazatelji istih. Mjerenjem vibracija može se otkriti kvarove ležaja rotora, rotorskih kaveza i niz drugih kvarova. Zbog činjenice da se većina kvarova manifestira i kroz povećanje vibracija, za interpretaciju rezultata mjerenja vibracija i donošenje suda o mogućem uzroku važno je iskustvo osobe ili kvaliteta ekspertnog sustava. U današnje je vrijeme mjerenje vibracija jedna od najvažnijih dijagnostičkih metoda u pogonima.

Najčešći uzroci povećanih vibracija rotacijskih električnih strojeva su:

- neuravnoteženost rotora,
- oštećenje ležaja,
- pogrešna montaža i temeljenje,
- oštećenje temelja,
- lokalna rezonancija konstrukcijskih dijelova,
- slučajno dodirivanje rotirajućih i mirujućih dijelova
- električke i magnetske nesimetrije.

Vibracije se dobro mogu osjetiti već dodirrom (čovjek opipom osjeća pomake iznosa 0.01 mm [9]). Mjere se tri osnovne veličine [1]:

- amplituda vibracija (od 0 do 10 kHz)
- brzina vibracija (10 Hz do 10 kHz)
- ubrzanje vibracije (1 kHz do >100 kHz)

Odabir veličine za mjerenje i analizu ovisi o ispitivanom stroju kao i o frekvencijama koje su interesantne za ispitivanja. Mjerenja vibracija izvode se vibrometrima, proksimetrima (inducirani napon ovisi o udaljenosti objekta od senzora), akcelerometrima (piezoelektričnim sensorima, mjere ubrzanje no koriste se i za mjerenje brzine i pomaka; željena se veličina dobiva integracijom). Dozvoljeni iznosi vibracija određeni su propisima.

3.3.1.4. Mjerenje struje

Signale pogonskih struja, u svrhu mjerenja, potrebno je prilagoditi mjernim uređajima. U te svrhe koriste se strujni transformatori i shuntovi. Shuntovi nisu pogodni za mjerenje velikih struja budući da se pri velikim strujama na shuntovima razvijaju veliki gubici koji mogu stvarati poteškoće prilikom konstrukcije shunta. Osim toga daju relativno male signale. U visokonaponskim uređajima strujni transformatori služe i za izoliranje mjerne opreme od visokih napona. Od strujnih mjernih transformatora se kao i od naponskih zahtijeva što stalniji prijenosni omjer i mali fazni pomak.

Strujni se transformatori susreću u niz izvedbi koje ovise o namjeni i radnim uvjetima. U mnogim postrojenjima mjerni su transformatori stalno ugrađeni i u nekim se slučajevima mogu koristiti za dijagnostičke svrhe. Za kontrolna mjerenja, kao i u slučajevima kada nije moguće iskoristiti ugrađene transformatore, koriste se strujna kliješta. Strujna kliješta su posebna izvedba strujnih mjernih transformatora koja omogućavaju priključenje bez potrebe za prethodnim prekidanjem strujnog kruga. Građena su tako da se željezna jezgra može rasklopiti i njome se obuhvati vodič protjecan strujom. Taj vodič predstavlja primarni namot strujnog transformatora, dok je sekundarni omotan oko same jezgre. Strujnim je kliještima moguće brzo izvršiti niz mjerenja, budući da se jednostavno prebacuju sa jednog vodiča na drugi. To ih čini vrlo pogodnima za dijagnostička mjerenja u pogonskim uvjetima.

Za mjerenje istosmjernih struja i struja niske frekvencije koriste se "istosmjerni transformatori" zasnovani na principu Hallove sonde.

3.3.2. Prikupljanje podataka

U većini slučajeva ovaj je dio teško u potpunosti odvojiti od obrade podataka. Prikupljanje podataka predstavlja zapisivanje izmjerenih podataka, uvjeta u kojima je snimanje izvršeno (opterećenje stroja, temperature, naponi itd.). Način zapisivanja podataka prvenstveno je određen daljom obradom podataka, odnosno operacijama koje će se na

zapisanim podacima izvršavati. Prikupljeni podaci moraju biti točni, kvalitetni i sa što manje šumova i smetnji. Mnogi dijagnostički sustavi vrše zapisivanje podataka tijekom dužeg vremenskog perioda. Takav način zapisivanja omogućuje kvalitetno praćenje stanja stroja kao i razvoj eventualnih kvarova i neispravnosti. U tom je slučaju vrlo važno da se podaci zapisuju sistematski i trajno. Kod nekih je postrojenja ispitivani objekt fizički udaljen od mjesta na kojem se vrši obrada podataka i dijagnostika, te prilikom zapisa veličina treba imati na umu i način na koji će se podaci prenositi (strujni signali, optika..), te se ponekad na licu mjesta vrše djelomične obrade. Na primjer u okolini u kojoj postoje smetnje vrlo se često podaci na licu mjesta digitaliziraju i u tom se obliku vrši dalja obrada. Pri tome je vrlo važno pretvorbu izvršiti na kvalitetan način, sa dovoljnim brojem i rezolucijom uzoraka, da se ne izgubi na kvaliteti snimljenog signala. Potrebno je voditi računa i o smještaju kabela i mjerne opreme.

3.3.3. Obrada podataka

Da bi se na temelju prikupljenih podataka mogla izvršiti dijagnostika stanja stroja na prikupljenim je podacima često potrebno izvršiti niz operacija. Upravo je ovo dio u kojem se računala najviše i najduže primjenjuju, i u kojem je moguća velika razina automatizacije procesa. Obrada podataka može se vršiti za vrijeme rada (on-line) ili nakon što su podaci zapisani i spremljeni (off-line).

Jedan od najjednostavnijih oblika obrade podataka je zapisivanje neke veličine tijekom dužeg vremenskog perioda, te usporedba izmjerene veličine sa prijašnjim vrijednostima. Kada se pojave veća odstupanja može se sumnjati na kvar.

Najraširenije su metode obrade podataka, za dijagnostičke svrhe spektralna analiza, korelacija i vremensko usrednjavanje. Razvoj mjerne i računarske tehnike je omogućio širu primjenu ovih metoda.

Spektralna analiza – osnova je metode prebacivanje signala snimljenih u vremenskoj domeni u frekvencijsku domenu. Analizom signala u frekvencijskoj domeni (struje, vibracije...) moguće je otkriti različite kvarove. Prebacivanje u frekvencijsku domenu predstavlja prikaz spektra frekvencija snimljenog signala i odgovarajućih amplituda. Osnova metode je Fourierova transformacija.

Ideja je transformacije periodički signal periode T , dan izrazom [1]:

$$g(t) = g(t + T) \quad (3-1)$$

prikazati jednoliko razmaknutim frekvencijskim komponentama koje se dobivaju kao:

$$G(f_k) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} g(t) \cdot e^{-j2\pi f_k t} dt \quad (3-2)$$

gdje k predstavlja k -ti harmonik osnovne frekvencije f . Obrnuto, iz frekvencijskog spektra vremenska se funkcija dobiva prema izrazu

$$g(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} G(f_k) e^{j2\pi f_k t} \quad (3-3)$$

Iz ovoga je vidljivo da se kontinuirani vremenski signal u frekvencijskoj domeni može prikazati ograničenim brojem diskretiziranih vrijednosti, što je vrlo korisno u digitalnoj obradi signala.

U nekim je slučajevima radi dalje obrade potrebno vremenski signal digitalizirati, odnosno prikazati kao niz diskretnih vrijednosti jednoliko razmaknutih u vremenu. Prebacivanje se provodi prema izrazu:

$$G(f_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} g(t_n) e^{-j2\pi f_k t_n} \quad (3-4)$$

Inverzna transformacija dana je izrazom:

$$g(t_n) = \sum_{k=0}^{N-1} G(f_k) e^{j2\pi f_k t_n} \quad (3-5)$$

Vidljivo je da je frekvencija uzorkovana na frekvencijama f_k a vremenski se signal uzorkuje u trenucima t_n . Ovaj oblik transformacije naziva se "Diskretna Fourierova transformacija". U digitalnoj se tehnici koristi posebni oblik koji se naziva "Brza Fourierova transformacija (FFT)".

Da bi se FFT-om dobila zadovoljavajuća točnost transformacije frekvencija uzorkovanja mora zadovoljiti Nyquistov kriterij, što znači da se snimanje mora izvršiti najmanje dvostrukom frekvencijom najviše frekvencije koju želimo analizirati. Kod analize statorsche struje bočni harmonici javljaju se na relativno malom razmaku od osnovne frekvencije. Radi toga Fourierovu transformaciju potrebno je provesti dovoljno visokom rezolucijom.

Da bi se rezolucija transformacije povećala N puta, potrebno je prikupiti N puta više uzoraka, budući da upravo broj uzoraka određuje rezoluciju transformacija. Klasična FFT daje

spektar koji pokriva frekvencije od 0 Hz do maksimalne snimljene frekvencije f_{max} . Veća rezolucija se može dobiti na nekoliko načina. Prvi je način povećati stupanj transformacije čime se povećava vrijeme potrebno za provođenje transformacije. Druga je mogućnost smanjivanje maksimalne frekvencije. Ovo rješenje nije uvijek povoljno budući da se time gube više frekvencije koje su potrebne za određivanje stanja ekscentriciteta. Slijedeće je rješenje povećanje vremena snimanja, što automatski daje bolju rezoluciju, uz uvjet da se osigura konstantnost mjerene veličine tijekom cijelog snimanja. U tom slučaju analiza se provodi izrezivanjem dijela spektra koji je zanimljiv (tzv. *ZOOM FFT*).

Funkcija korelacije – pojavljuje se u dvije varijante: auto-korelacija i korelacija. Funkcija autokorelacije predstavlja mjeru sličnosti neke funkcije i iste te funkcije pomaknute u vremenu za vrijeme τ .

Funkcija autokorelacije dana je izrazom [1]:

$$R_{ff}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t-\tau)f(t)d\tau \quad (3-6)$$

Funkcija korelacije prikazuje se u ovisnosti o τ i ima najveće vrijednosti na mjestima poklapanja funkcija.

Funkcija korelacije ima oblik [1]

$$R_{fh}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t-\tau)h(t)dt \quad (3-7)$$

Funkcije korelacije koriste se za smanjivanje šuma u signalima.

Usrednjavanje signala – usrednjavanje signala često se koristi kod dijagnosticiranja kvarova ležajeva i reduktora; repetitivni se snimak davača ponavlja nekoliko puta uzastopno, a usrednjavanjem signala smanjuje se utjecaj smetnji, pa vrijednosti nastala uslijed kvara bolje dolaze do izražaja. U praksi se vrlo često iščitava veliki broj uzoraka tijekom dužeg vremenskog perioda. U tom slučaju broj uzoraka koje je potrebno usrednjavati zahtijevao bi veliku memoriju za zapisivanje vrijednosti. Da bi se broj zapisa smanjio usrednjavanje se vrši prema izrazu 3-8:

$$\bar{x}_n = \bar{x}_{n-1} + \frac{x_n - \bar{x}_{n-1}}{n} \quad (3-8)$$

gdje su: n broj zapisa, x_n vrijednost varijable n -tog zapisa, a $\bar{x}_n$ i $\bar{x}_{n-1}$ srednje vrijednosti n i $n-1$ varijabli. Ovim načinom srednja vrijednost zapisa se u svakom trenutku može izračunati pomoću samo dva snimljena zapisa. Na taj način uštede u memoriji su velike ali treba voditi računa o brzini računanja posebice kada je period uzimanja uzoraka kratak.

Nakon konačne obrade podataka, može se vršiti dijagnostika kvara. U cilju jednostavnije dijagnostike vrlo je važno da podaci iz kojih se vrši dijagnostika budu u što jednostavnijem i preglednijem obliku i da sadržavaju informacije neophodne za točno otkrivanje problema.

3.3.4. Dijagnostika

Otkrivanje vrste i veličine kvara, odnosno mogućeg uzroka, zadnja je i ključna faza dijagnostičkog procesa. U današnje vrijeme to je još uvijek faza koja je najmanje automatizirana i u kojoj u mnogim slučajevima do izražaja dolazi čovjek. Za neke slučajeve postoje razvijeni ekspertni sustavi koji daju kvalitetne rezultate, ali konačna odluka vrlo je često na stručnjaku. Tendencije su razvoja primjena metoda umjetne inteligencije i algoritama za dijagnostiku. Korištenje računala olakšava dijagnostiku zbog složenosti postupka, kao i vrlo često velikog broja podataka i parametara koje treba uzeti u obzir.

U ovom će radu biti opisane metode dijagnosticiranja stanja asinkronog stroja. Detaljnije će biti opisana metoda dijagnosticiranja kvarova kaveznih rotora spektralnom analizom statorske struje, mjerenjem napona osovine i analizom signala mjernog svitka.

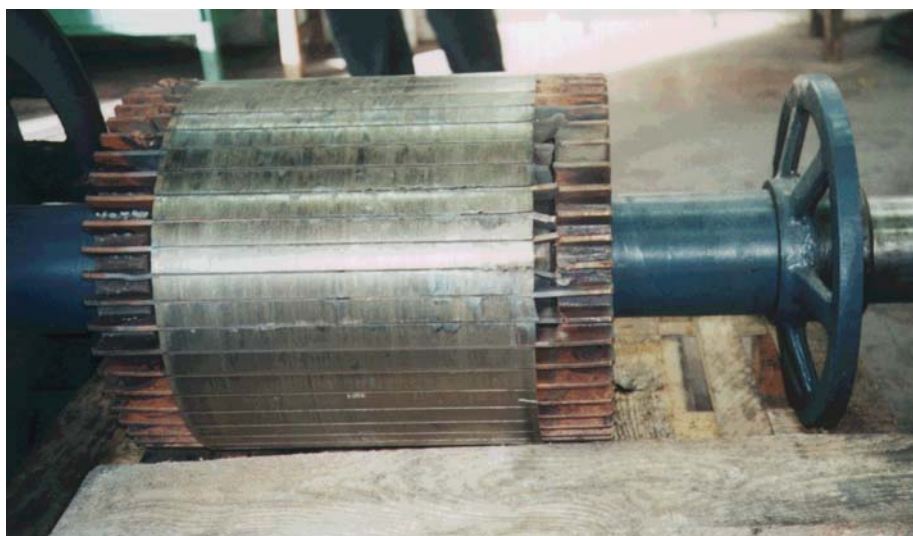
4. ROTORSKI KVAROVI ASINKRONIH MOTORA I METODE DIJAGNOSTIKE

Zbog svoje robusne izvedbe, te relativno jednostavne izrade, kavezni su asinkroni motori osnova većine modernih elektromotornih pogona. Dugo vremena, osnovna je mana asinkronih strojeva bila složeno upravljanje brzinom vrtnje. Današnji moderni frekvencijski pretvarači vrlo uspješno rješavaju takve probleme po sve nižim cijenama. Zbog toga asinkrone strojeve nalazimo ugrađene u 50-70 % [3], [13] industrijskih pogona. Upravo iz tih razloga težište ovog rada biti će na dijagnostici kvarova asinkronog stroja, posebice kvarova rotorskog kaveza. Istraživanje kvarova asinkronih strojeva na većem broju strojeva u stvarnim pogonima (180 komada) dalo je prema [11] slijedeću raspodjelu prema vrsti kvara (tablica 4-1).

kvar	% ukupnih kvarova
namota statora	26.50
namota rotora	31.65
paketa statora	9.34
paketa rotora	13.25
vratila i ležajeva	12.94
ostalo	6.32

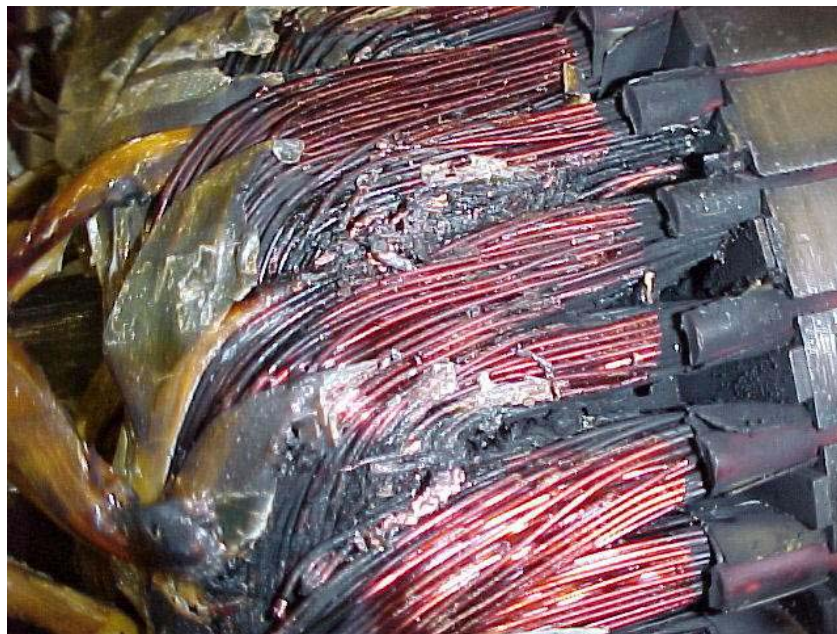
Tablica 4-1: Raspodjela kvarova asinkronog stroja prema vrsti

U prošlosti, te prema nekim drugim autorima [3], [13], nešto je veći postotak kvarova statorskih namota. Uporaba najnovijih mika izolacija, kao i novih metoda impregnacije, smanjile su taj postotak.



Sl. 4-1 Primjer potpuno uništenog rotorskog kaveza

Iako su rotorski kavezi vrlo čvrsti i izdržljivi, veliki postotak kvarova asinkronih strojeva otpada upravo na njih. Primjer potpuno oštećenog kaveza asinkronog motora prikazan je na slici 4-1, dok je na slici 4-2 prikazano veliko oštećenje rotora asinkronog motora sa usipnim namotom (klizno kolutni motor).



Sl. 4-2 Primjer teškog oštećenja rotorskog namota kliznokolutnog stroja

Razlozi leže u tehničko-tehnološkoj izvedbi, te uvjetima rada motora. Tijekom rada asinkroni je motor izložen velikim termičkim i mehaničkim naprezanjima. Uslijed tih naprezanja na štapovima i spojevima štapova sa prstenom nastaju lomovi i pukotine, koje se daljnjim radom povećavaju i šire. Budući da zbog oštećenja struja ne može teći kroz oštećeni štap, dio struje koji bi prirodno tekao kroz njega preuzimaju ostali štapovi, prvenstveno susjedni, koji su zbog toga još više izloženi naprezanjima. Kao posljedica toga vrlo često nakon puknuća jednog štapa vrlo brzo dolazi do oštećenja susjednih. Prema [13] uzroci tih oštećenja mogu se podijeliti u tri osnovne grupe:

- učestala pokretanja direktnim priključenjem na mrežu, za koja stroj nije predviđen. Takav rad uzrokuje velika termička opterećenja,
- rad sa promjenjivim teretima i udarnim opterećenjima poput npr. mlinova i drobilica, pri kojima je rotor izložen velikim mehaničkim naprezanjima,
- pogreške nastale u procesu izrade.

Iako stroj može nastaviti sa radom i u slučaju puknutog štapa, radne su mu karakteristike (moment, stabilnost brzine vrtnje...) narušene. Isto tako, može se desiti da oštećeni dio štapa

mehanički oštetiti glave statorskog namota, što drastično povećava troškove popravka. Oštećenja kaveza posebno su opasna u uvjetima eksplozivne okoline zbog mogućnosti iskrenja.

Kvarovi asinkronih motora nastaju kao posljedica različitih naprezanja, koja se mogu podijeliti u nekoliko grupa [14]:

- termička naprezanja
- elektromagnetska naprezanja
- dinamička naprezanja
- dodatna mehanička naprezanja

Uzroci naprezanja mogu biti različiti poput na primjer [14]:

- radni moment
- torzione vibracije
- rezidualne sile nastale u procesu proizvodnje (lijevanja, strojna obrada...)
- magnetske sile uzrokovane utorskim rasipnim tokom koji pulsira dvostrukom frekvencijom rotorske struje
- magnetske sile kao posljedica ekscentriciteta zračnog raspora
- centrifugalne sile
- termička naprezanja uslijed zagrijavanja kratkospojnih prstena
- termička naprezanja tijekom zaleta zbog potiskivanja struje (skin efekt)
- termička naprezanja nastala istezanjem štapova

Termička naprezanja – mogu se pojaviti kada je stroj zakočen, prilikom zaleta ili tijekom rada. Najkritičnije je kada je stroj zakočen budući da je tada odvođenje topline najslabije. Veliki dio strojeva toplinske senzore ima smještene na statoru, pa se može desiti da u trenutku kada signaliziraju pregrijavanje, rotorska temperatura već bude prevelika. Termička naprezanja rotora mogu biti posljedica preopterećenja zbog npr.: učestalih pokretanja, zaustavljanja uslijed prevelikih tereta, neuspješnog zaleta zbog prirode momentne karakteristike tereta, zapinjanja rotora o statorski paket, loše ventilacije itd. Kao slijedeći problem u radu stroja pojavljuje se termička neuravnoteženost koja može biti posljedica nejednolikih zagrijavanja rotorskog kaveza tijekom zaleta, nejednakog odvođenja topline, slabljenja dosjeda rotorskog paketa na osovinu, lokalnih oštećenja rotorskog paketa itd. Ovi su problemi vrlo često složeni za otkrivanje budući da u slučajevima kada stroj nije potpuno opterećen ne dolaze do izražaja.

Elektromagnetska naprezanja - do oštećenja rotorskog kaveza može doći i zbog magnetskih naprezanja u stroju koja mogu imati različite uzroke. Rotorska struja stvara ulančeni utorski tok, koji stvara elektrodinamičke sile u stroju. Te su sile proporcionalne kvadratu struje i nastoje rastegnuti rotorske štapove u utoru. Tijekom zaleta rotorske su struje najveće pa su i sile kojima je izložen rotor povećane. Najveća su opterećenja na spojevima štapova i prstena. Ispitivanja su pokazala da su upravo ove sile izazvale veliki broj oštećenja. Ovakvi se problemi umanjuju različitim konstrukcijama rotorskih kaveza.

Dinamička naprezanja – opterećuju rotor tijekom rada i najveća su u prijelaznim stanjima. Pod njima se obično misli na torzijska naprezanja osovine (u prijelaznim stanjima i pri udarcima mogu poprimiti i veličine 20 puta veće od nominalnih), centrifugalne sile, te ostala opterećenja koja nastaju zbog prijenosa, kvarova spojki ili zupčanika.

Dodatna mehanička naprezanja – obuhvaćaju naprezanja koja nastaju kao posljedica ostalih nepravilnosti: lošeg lijevanja, nedovoljno učvršćenih limova rotorskog paketa, loših dosjeda rotorskog paketa na osovinu, kvarova ležajeva, u slučajevima kada rotorski štapovi nisu čvrsto u utorima te dolazi do radijalnih pomicanja tijekom rada, kada ne postoji mogućnost uzdužnog širenja štapova u toku zagrijavanja.

4.1. Metode dijagnostike rotorskih kvarova asinkronog stroja

Tablica 4-2: Dijagnostičke metode za otkrivanje kvarova u rotoru asinkronog stroja

A	METODE U POGONU "ON LINE"	B	METODE IZVAN POGONA "OFF LINE"
A1	Promatranje titranja kazaljki ampermetra na statorskoj strani	B1	Vizualni pregled motora
A2	Mjerenje i analiza vibracija statorskog paketa	B2	Primjena penetranata
A2	Mjerenje aksijalnog (rasipnog) magnetskog toka	B3	Ultrazvučna metoda
A4	Snimanje fluktuacija brzine vrtnje rotora	B4	X-zrake
A5	Mjerenje i analiza vibracija ležaja motora (ležajni štitovi)	B5	Ispitivanje jednofaznim napajanjem
A6	Snimanje i analiza struja u zaletu motora	B6	Mjerenje otpora štapova i prstena
A7	Analiza spektra jedne linijske struje namota statora	B7	Ispitivanje specijalnim uređajima
A8	Analiza signala s posebnih svitaka ugrađenih u namot statora u svrhu dijagnostike kvarova		

4.1.1. Vizualni pregled stroja

Vizualni pregled stroja prva je i najjednostavnija metoda utvrđivanja stanja asinkronog stroja. Pogon je potrebno zaustaviti a stroj rastaviti.

U slučajevima kada je stroj zaustavljen potrebno je pregledati stroj a posebno rotorski paket. Iskrenja, pregrijanja i loši spojevi vrlo se često mogu locirati mjestima na kojima su limovi promijenjene boje. Kod velikih se pregrijavanja znaju pojaviti i slučajevi otapanja kaveza. U tim je slučajevima moguće približno odrediti i stanje u kojem je došlo do kvara. U slučajevima kada je do kvara došlo prilikom mirovanja stroja (zakočeni rotor), otopljeni se materijal tipično nalazi na dnu stroja. Kada se stroj pregrijao uslijed preopterećenja otopljene će nakupine biti po cijeloj površini. Otopljeni dijelovi u utorima navode na zaključak o pregrijavanju za vrijeme rada.

Kada je oštećenje štapa veće, osluškivanjem zvuka udaraca tvrdim predmetom po štapovima, može se detektirati oštećenje.

Kvarovi kod kojih je došlo do struganja rotora o stator, uvijek ostavljaju vidljive tragove na oba paketa. U slučaju postojanja dinamičkog ekscentriciteta obično je vidljivo oštećenje na jednom dijelu rotorskog paketa i cijelim obodom statorskog provrta. Ako je do struganja došlo uslijed magnetske neuravnoteženosti, struganje obično ostavi tragove na cijelom rotorskom paketu ali na statorskom provrtu samo na jednom mjestu. Pažljivim promatranjem ovakvih pokazatelja, može se steći gruba procjena stanja kao i uzroka kvara.

Ovakvi se kvarovi u radu mogu manifestirati povećanom razinom buke i vibracija.

4.1.2. Primjena penetranata

Primjena penetranata olakšava pronalaženje sitnih pukotina na štapovima i kratkospojnim prstenovima. Penetranti su specijalne tekućine ili sprejevi (bitemor, hidrofilan), kojima se prska rotor stroja. Penetrant se uvuče u pukotine, koje onda postaju vidljive. Primjer upotrebe penetranata za otkrivanje pukotina u prstenima vidljiv je na slici 4-3.



Sl. 4-3 Upotreba penetranta za otkrivanje pukotina u prstenu

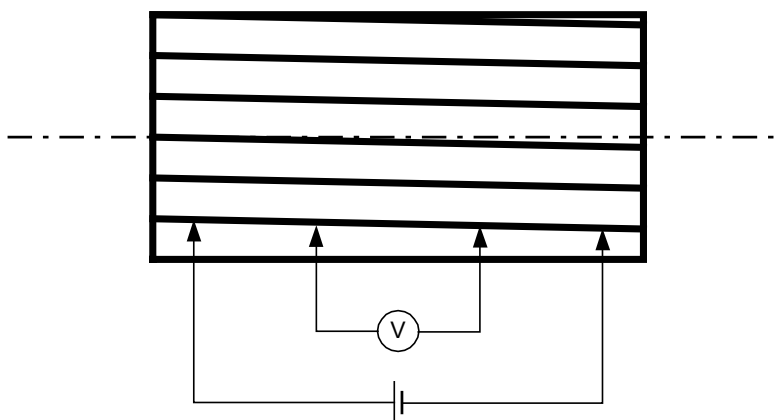
4.1.3. Provjera ultrazvukom

Ultrazvučnom provjerom kaveza stroja moguće je otkriti pukotine koje nisu vidljive golim okom. Pored toga moguće je detektirati pukotine koje su u radu kada je stroj zagrijan, zatvorene, i pojavljuju se u hladnom stanju. Metodu je moguće provesti isključivo kada je stroj rastavljen.

Na sličan se način kavez stroja može ispitati i korištenjem x-zraka.

4.1.4. Mjerenje otpora štapova i prstena

U slučajevima kada je stroj rastavljen lomovi se štapova mogu otkriti i mjerenjem otpora U-I metodom. Mjerenja se najčešće provode po segmentima štapa, a ne za cijeli štap odjednom. Takav način mjerenja omogućuje točnije lociranje mjesta kvara.



Sl. 4-4 Mjerenje otpora štapova i prstena

4.1.5. Kontrola rotacijom pri jednofaznom napajanju

Ova metoda provodi se kada stroj nije u vrtnji ali ne zahtijeva rastavljanje stroja. Na dva motorska izvoda priključi se jednofazni napon iznosa 5-10 % nazivnog. Rotor stroja zakreće se rukom i pri tome se pomoću strujnih kliješta promatra struja napajane faze. U trenutku kada slomljeni rotorski štap dođe u položaj ispod napajanog para polova, pojaviti će se titranje struje. Ovaj test nije uvijek moguće provesti.

4.1.6. Promatranje titranja kazaljki ampermetara

U slučaju oštećenja rotorskog kaveza u okretnom se polju javlja inverzna komponenta protjecanja. Ta se komponenta odražava na statorskoj struji što se može uočiti kao titranje kazaljki ampermetara. Dodatna je komponenta proporcionalna klizanju, pa je i titranje kazaljki ovisno njemu.

4.1.7. Analiza vibracija

Vibracije su kao dijagnostički signal dosta raširene. Izmjereni signal vibracija sadrži informacije o stanju stroja, koje je daljom obradom moguće rekonstruirati. Snimljeni signal najčešće se promatra u frekvencijskoj domeni (obrada FFT-om). Važno je uzeti u obzir da svaki pojedini stroj ima vlastiti karakteristični spektar vibracija. Da bi se signal vibracije mogao iskoristiti kao dijagnostički veličina, važno je mjerenja obavljati u pravilnim vremenskim intervalima, a svaka promjena spektra može upućivati na kvarno stanje [2], [3].

Budući da svaka nesimetrija rotorskog kaveza, za sobom povlači i promjenu polja u rasporu, kao posljedica kvara mijenjaju se i sile, a time i vibracije stroja.

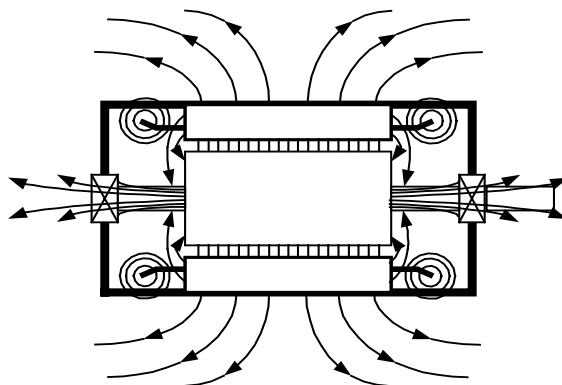
Više o mjerenju vibracija moguće je pronaći u [2], [9], [29].

4.1.8. Snimanje aksijalnog rasipnog toka

Čak i u slučaju kada se radi o ispravnom stroju, svaki stroj sadrži određene nesimetrije. Nesimetrije nastaju kao posljedica izrade, nejednolike debljine ili kvalitete materijala u svim dijelovima. Posljedica su pojave da se protjecanje u jednom dijelu glava namota, razlikuje od protjecanja u dijelu koji je smješten dijametralno na obodu stroja. Rezultat te razlike pojava je aksijalnih tokova u osovini stroja. Aksijalni rasipni tok stroja prikazan je na slici 4-5. Ukoliko se mjerni svitak postavi koncentrično na osovinu (osovina prolazi kroz zavojnici) u njoj se inducira napon zavisen o aksijalnim tokovima. Snimanjem i spektralnom analizom tog napona, može se otkriti niz problema i kvarnih stanja; oštećenja štapova kavezniha motora, međuzavojne kratke spojeve statorskog i rotorskog namota (klizno kolutni motori), gubitak jedne faze napajanja, ekscentricitet itd. Ova je metoda nedestruktivna i jednostavno primjenjiva korištenjem računala. U slučaju pojave kvara (statora ili rotora), nesimetrija stroja

se povećava i mijenja se i aksijalni tok. Jednako tako svaka promjena magnetskog kruga stroja (koja nastaje na primjer kod pojave ekscentriciteta) odraziti će se i u aksijalnom toku.

Osim aksijalnih tokova, u stroju se javljaju i ostali rasipni tokovi, prema ilustraciji na slici 4-5 [24].



Sl. 4-5 Rasipni tokovi stroja

Kako svaki kvar rotorskog kaveza ima za posljedicu i promjenu polja u zračnom rasporu, promijeniti će se i ukupno polje u stroju. Takva promjena osjetiti će se i u rasipnim tokovima. Iz slike je vidljivo da ukoliko mjerni svitak postavimo na bilo kojem dijelu stroja na kojem postoje rasipni tokovi, u njemu će se inducirati napon. Snimanjem i analizom inducirano napona moguće je dijagnosticirati pojavu kvarova u rotorskom kavezu.

U sklopu rada izvršeno je snimanje rasipnog toka, korištenjem mjernog svitka smještenog na vanjskoj strani stroja. Opis mjerenja i pregled dobivenih rezultata dan je u poglavlju 6.5.

Dijagnostika stanja asinkronog stroja mjerenjem aksijalnog toka svodi se na promatranje promjene spektra toka. Aksijalni tok u sebi sadrži dvije komponente; komponentu statorske struje i komponentu rotorske struje. Prema tome, da bi se mogle ustanoviti nesimetrije neophodno je poznavati mrežnu frekvenciju kao i frekvenciju rotorskih struja, odnosno klizanje.

Kada rotor stroja miruje, frekvencije su rotorskih struja jednake frekvenciji statorskih struja, pa je i frekvencija ukupnog polja u rasporu, a time i aksijalnog toka, jednaka mrežnoj frekvenciji. Kada se stroj vrti, frekvencija se rotorskih struja mijenja ovisno o klizanju. Za očekivati je da će se ta promjena odraziti i na aksijalnom toku. U slučaju simetričnog trofaznog stroja napajanog iz simetričnog trofaznog izvora u zračnom rasporu stroja, raspodjela magnetske indukcije nije sinusoidalna, već postoje viši prostorni harmonici i dana je izrazom 4-1 [2]

$$B(\theta, t) = B_1 \cos(\omega_1 t - p\theta) + B_5 \cos(\omega_1 t + 5p\theta) - B_7 \cos(\omega_1 t - 7p\theta) + \\ + B_{11} \cos(\omega_1 t + 11p\theta) - \dots \quad (4-1)$$

gdje su: θ - prostorni kut na obodu stroja

t - vrijeme

ω_1 - sinkrona kutna brzina

p - broj pari polova

Ukoliko se izraz 4-1 napiše u koordinatnom sustavu koji rotira sa rotorom dobiva se izraz 4-2 :

$$B(\theta, t) = B_1 \cos(s\omega_1 t - p\theta) + B_5 \cos[(6-5s)\omega_1 t + 5p\theta] - B_7 \cos[(7s-6)\omega_1 t - 7p\theta] + \\ + B_{11} \cos[(12-11s)\omega_1 t + 11p\theta] - \dots \quad (4-2)$$

Vidljivo je da čak i u slučaju simetričnog i ispravnog stroja, polje u rasporu i aksijalni tok, sadrže i frekvencije koje ovise o klizanju. Kako u praksi uvijek postoje određene nesimetrije, ove dodatne frekvencije pojaviti će se i u aksijalnom rasipnom toku. U slučaju kada se pojave dodatne nesimetrije, pojavljuju se i dodatne frekvencijske komponente. Naime svaka pojava dodatne nesimetrije uzrokuje pojavu inverznog protjecanja, što se odražava i na frekvencijskom spektru struje. Općenito, sve promjene koje se uslijed nesimetrije pojavljuju u struji, moraju se odraziti i na aksijalnom toku.

Harmoničkom analizom aksijalnog toka moguće je otkriti i kvarove statorskog namota. Istraživanja su pokazala [23], [30] da je, ukoliko se četiri zavojnice postave u pravilan raspored oko radijusa stroja, moguće analizom napona induciranih u zavojnicama locirati i mjesto kvara statorskog namota. Frekvencijske komponente vidljive u aksijalnom toku, nastale uslijed kvarova armature, dane su izrazom 4-3 [23].

$$\left(k \pm \frac{n}{p} \cdot (1-s) \right) \cdot f_1 \quad (4-3)$$

gdje su: k - 1, 3, ...

p - broj pari polova

f_1 - frekvencija mreže

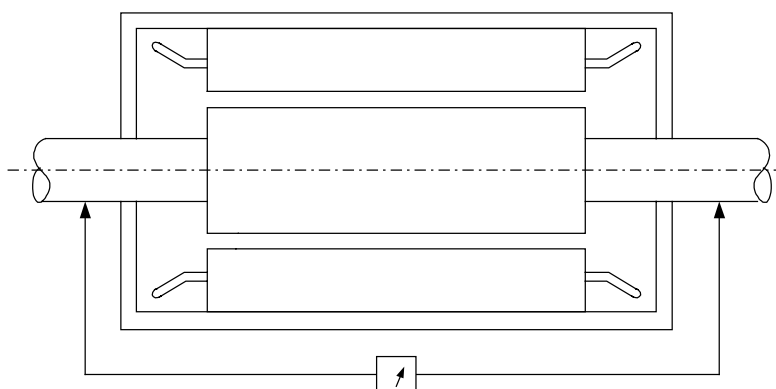
s - klizanje

n - 1, 2, 3, ..., (2p-1)

Metoda dijagnosticiranja spektralnom analizom aksijalnog toka još se razvija. Nedostaci metode su zahtjevi za specijaliziranom opremom, te nedovoljna provjerenost metode.

4.1.9. Analiza osovinskih struja i napona

Kao dijagnostičke veličine mogu se koristiti inducirani osovinski napon i ležajne struje. Osovinske struje se uobičajeno mjere i zbog toga što kod velikih strojeva, one mogu poprimiti iznose koji oštećuju ležajeve. Osovinski naponi i struje induciraju se zbog postojanja aksijalnih tokova (više o aksijalnim tokovima i njihovom nastajanju dano je u odsječku 4.1.8), kao posljedica nesimetrija. Jedan jednostavni način mjerenja osovinskih napona, prikazan je na slici 4-6.



Sl. 4-6 Priključenje mjernog instrumenta pri mjerenju osovinskih napona

Iskustva međutim pokazuju [1], da mjerenja osovinskih struja ili napona ipak nisu pogodna metoda dijagnostike stanja. Pri malim su strujama, prijelazni otpori između osovine i četkica preveliki da bi se osjetile male promjene. Često se dešavalo da su se kvarovi u stroju razvili do većih razmjera prije nego su uočene promjene u struji i naponu. Iz tih razloga osovinske se struje mjere povremeno da ne dosegu vrijednosti opasne za ležajeve.

4.1.10. Snimanje rotorske struje

U slučajevima kada se u pogonu koriste klizno kolutni asinkroni strojevi, loš kontakt četkica i kliznih prstena može izazvati smetnje u radu. Nesimetrije otpora priključenih u krug rotora, mogu izazvati povišeno zagrijanje rotora. Problem mjerenja rotorskih struja, leži u činjenici da su struje i naponi rotorskog kruga niske frekvencije (frekvencije su proporcionalne klizanju). Niska frekvencija, čini mjerenje pomoću standardnih strujnih transformatora nemogućim. Za mjerenje tih struja se prema [1] koriste Rogowski zavojnice. Vršiti se mjerenje sve tri rotorske struje, signali se integriraju da bi se dobili naponi proporcionalni strujama i izračunava se srednja vrijednost. Tako dobivena vrijednost struje

uspoređuje se sa strujama pojedinih faza. U slučaju nesimetrije nadzorni uređaj uključuje odgovarajuću signalizaciju.

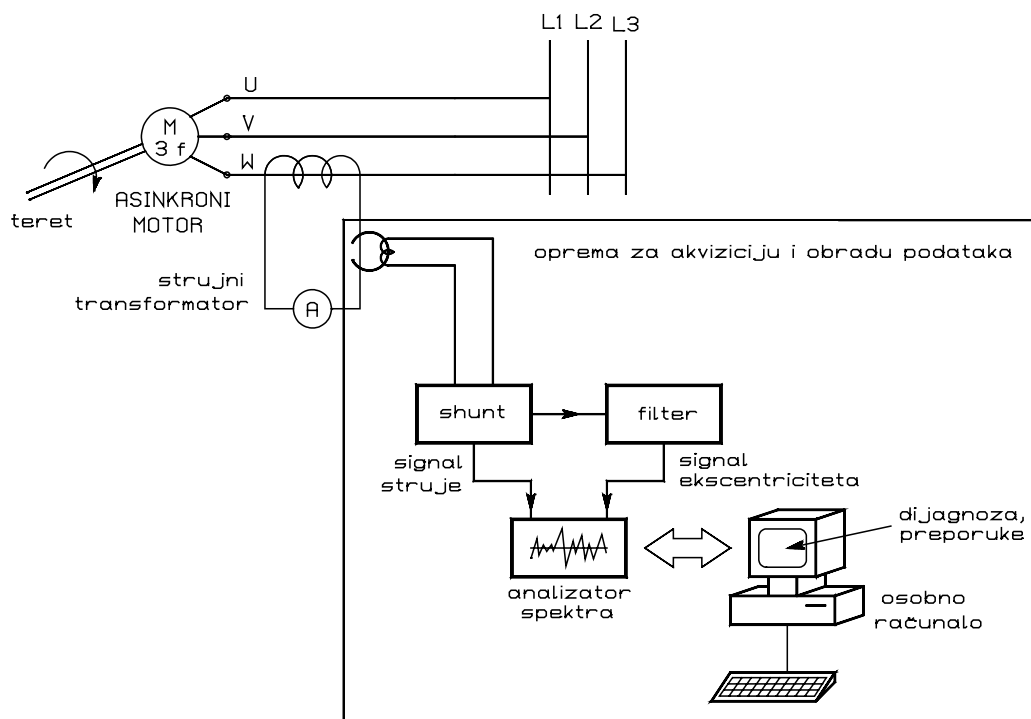
4.1.11. Analiza razvijenog momenta i brzine vrtnje

Slomljeni štapovi rotora odražavaju se i na oscilacijama razvijenog momenta i brzine vrtnje. U simetričnom trofaznom asinkronom motoru, direktna komponenta okretnog polja djeluje na rotorske štapove protjecane strujama ovisnim o klizanju i stvara jednoliki izlazni moment. U slučaju oštećenja rotorskog kaveza, pojavljuje se inverzna komponenta (opširnije u 5.5). Inverzna komponenta stvara dodatni moment čija vrijednost oscilira dvostrukom frekvencijom klizanja. Ovaj se dodatni moment sumira sa osnovnim momentom. Snimanjem i spektralnom analizom moguće je uočiti pojavu dodatnih harmonika, koji ovise o klizanju i pojavljuju se na frekvencijama $2sf_l$ i $4sf_l$ [24],[27]. Ovaj dodatni moment povećava vibracije i buku.

5. SPEKTRALNA ANALIZA STATORSKE STRUJE

5.1. Spektralna analiza statorske struje

Od svih metoda on-line dijagnostike stanja asinkronih strojeva, metoda spektralne analize statorske struje (engl. *Motor current signature analysis MCSA*), u novije se vrijeme najviše razvija. Razlozi za ubrzani razvoj ove metode su višestruki. Kao prvo, mjerenje struje ne zahtijeva postavljanje nikakvih dodatnih uređaja, sondi ili mjernih članova, što osjetno poskupljuje provedbu ostalih metoda. Za mjerenje struje koriste se strujni transformatori, najčešće u izvedbi strujnih kliješta. Obzirom na činjenicu da je većina motora u pogonu opremljena mjernim instrumentima, vrlo često dovoljna su jedna strujna kliješta za mjerenje struje većine motora u pogonu. Principijelna shema spektralne analize statorske struje prikazana je na slici 5-1. Signal struje, izmjeren pomoću strujnih kliješta odvodi se na spektralni analizator, provodi se brza Fourierova transformacija (FFT) i dobiveni se spektar odvodi u računalu. U računalu se dobiveni spektar analizira i dijagnosticira se stanje stroja.



Sl. 5-1 Principijelna shema sustava za spektralnu analizu statorske struje

U ovom radu obrada signala izvedena je na nešto drugačiji način. Umjesto korištenja spektralnog analizatora, Fourierova se transformacija provodi na računalu. Budući da računalo radi s diskretnim podacima, potrebno je analogni signal strujnih kliješta pretvoriti u digitalni. U tu svrhu iskorištena je kartica A/D pretvarača. Više o korištenoj kartici dano je u

odsječku 6.1. Prednosti ovakvog pristupa su prije svega u cijeni. Naime, spektralni analizatori su redovito vrlo skupi uređaji, dok su cijene A/D kartica osjetno niže. Osim toga za primjene kada nije potrebna visoka rezolucija diskretizacije, kakvu obično imaju spektralni analizatori, moguće je odabrati jeftiniju karticu sa nižom maksimalnom frekvencijom diskretizacije. Osim toga, A/D kartice ugrađuju se u računalo, dok je spektralni analizator dodatni uređaj velike mase i dimenzija, što osjetno olakšava rad na terenu i u postrojenjima, kada je potrebno ispitati više dislociranih strojeva. Ove prednosti naročito dolaze do izražaja u novije vrijeme kada su prijenosna računala sve pristupačnija i raširenija.

Druga je prednost dijagnostike spektralnom analizom, činjenica da se u spektru struje javljaju promjene u slučaju niza kvarova, pa se iz jednog mjerenja može donijeti sud o stanju različitih dijelova stroja. Naime, svako kvarno stanje predstavlja određenu nesimetriju, koja u zračnim rasporu mijenja oblik magnetskog polja. Svaka takva promjena u statorskom namotu inducira napone koji u odnosu na napon mreže imaju određen frekvencijski pomak.

Nažalost, upravo činjenica da sva kvarna stanja asinkronog stroja ostavljaju trag na spektru statorske struje, čini donošenje suda o točnoj prirodi kvara složenom i zahtijevaju povećani oprez. Naime postoji mogućnost da se nepravilnosti spektra nastale istrošenim ležajevima na primjer, pogrešno interpretiraju kao nesimetrije rotorskog kaveza.

U sklopu ovog rada detaljno je proučena promjena spektra statorske struje u slučaju kvara rotorskog kaveza. Statorska struja jednog stroja snimljena je i analizirana za 5 stupnjeva kvara, uključujući i ispravan stroj. Detaljnije objašnjenje pojave dodatnih harmonika uslijed pojave nesimetrije dano je u odsječku 5.5. Opis snimanja i pregled snimljenih rezultata nalazi se u poglavlju 6. Ostali kvarovi koji se mogu otkriti spektralnom analizom statorske struje dani su samo pregledno u skraćenom obliku.

5.2. Detekcija kvarova ležajeva

Veliki postotak kvarova strojeva (tablica 4-1) vezan je upravo uz ležajeve strojeva. Prema nekim podacima taj se postotak penje i do 40% [13], [19], [23], [24].

Mogućnost detekcije kvarova ležajeva analizom statorske struje leži u činjenici, da svaka pojava nesimetrije raspora, uzrokuje promjenu polja u zračnom rasporu. Pojava ekscentriciteta zračnog raspora uobičajena je popratna pojava kvara ležajeva, pa se može očekivati da se kvar ležajeva odrazi i na spektru struje.

Vibracije uzrokovane problemima sa ležajevima, odražavaju se na spektru struje [23] na frekvencijama danim izrazom:

$$f_{le\dot{z}} = |f_1 \pm m \cdot f_v| \quad (5-1)$$

gdje su: $f_{le\dot{z}}$ - frekvencija dodatnih harmonika nastalih zbog kvara ležaja,
 f_1 - frekvencija mreže,
 m - 1, 2, 3, ...,
 f_v - karakteristična frekvencija vibracije zbog kvara ležajeva

5.3. Detekcija kvarova statorskog namota

Spektralnom analizom moguće je detektirati kvarove statorskog namota [13], [23]. Predmet je analize izdvojiti komponente koje su posljedica isključivo kvara namota i razlikovati ih od ostalih komponenti. Pod razmatranim se kvarovima prvenstveno misli na međunamotne i međuzavojne kratke spojeve.

Frekvencije koje je moguće uočiti u spektru statorske struje, nastale uslijed kvarova statorskog namota dane su izrazom 5-2 [13].

$$f_{st} = f_1 \left\{ \frac{n}{p} \cdot (1-s) \pm k \right\} \quad (5-2)$$

gdje su: f_{st} - frekvencija harmonika nastalih zbog statorskih kvarova
 f_1 - frekvencija mreže
 p - broj pari polova
 s - klizanje
 n - 1, 2, 3, ..., (2p-1)
 k - harmonički član 1, 2, 3, ...

5.4. Detekcija rotorskog ekscentriciteta analizom statorske struje

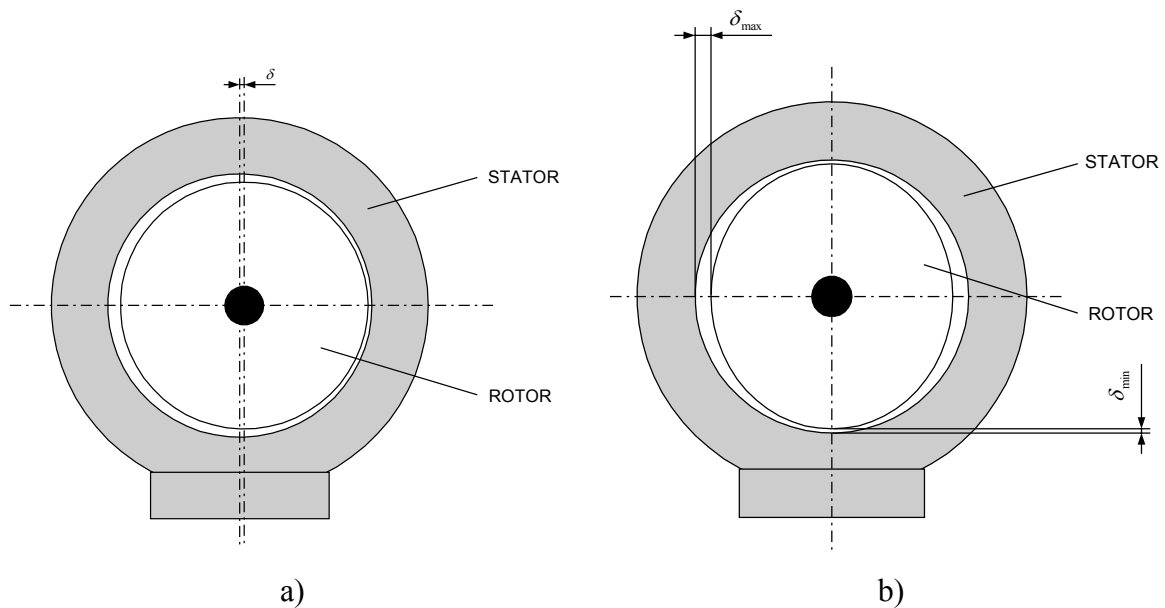
Ekscentricitet zračnog raspora može se pojaviti uslijed nekoliko razloga:

- središte rotora ne poklapa se sa osi rotacije,
- svinuta osočina,
- ekscentrični provrt statora,
- os rotora i os statora se ne poklapaju,
- istrošeni ležajevi,
- osočina ili rotorski paket nisu potpuno cilindrični itd.

U slučajevima kada postoji ekscentricitet zračnog raspora magnetske sile mogu izazvati velike probleme. Naime, na strani na kojoj je zračni raspoređivanje manji, manji je magnetski otpor te

su sile kojima stator privlači rotor veće, što uzrokuje daljnje smanjenje zračnog raspora. Ukoliko se ovaj proces nastavi može doći do zapinjanja rotora o statorski paket. Ovi problemi rješavaju se konstrukcijom stroja, ograničavanjem dozvoljenog ekscentriciteta ili učvršćenjem osovine. Osim ovih problema postojanje ekscentriciteta izaziva vibracije i buku.

Najpouzdanija, i danas najčešće korištena metoda otkrivanja postojanja ekscentriciteta u pogonu (*on-line*) je spektralna analiza statorske struje.



Sl. 5-2 Prikaz nastanka a) statičkog i b) dinamičkog ekscentriciteta

Razlikuju se dva osnovna tipa ekscentriciteta: statički i dinamički. U slučaju statičkog ekscentriciteta, mjesto smanjenog ili povećanog zračnog raspora ne giba se sa rotacijom stroja. Takav tip ekscentriciteta javlja se npr. u slučaju nepravilnog provrta statora ili netočno ugrađenog rotora u stator. Skica nastanka statičkog ekscentriciteta prikazana je na slici 5-2 a), gdje δ predstavlja nepoklapanje osi rotora sa osi statorskog provrta. Razina statičkog ekscentriciteta se, ako je rotor čvrsto učvršćen, ne mijenja tijekom rada, i stoga je manje opasan od dinamičkog ekscentriciteta. Zbog postojanja nesimetrije zračnog raspora ovaj tip ekscentriciteta stvara dodatne komponente u spektru statorske struje. U slučaju dinamičkog ekscentriciteta mjesto izmijenjenog zračnog raspora slijedi rotaciju stroja. Dinamički se ekscentricitet javlja u slučajevima kada os rotacije nije u osi rotora, loših ležajeva, necilindričnog rotora, mehaničke rezonancije na kritičnim brzinama itd. Pojašnjenje je prikazano na slici 5-2 b). Dinamički je ekscentricitet opasan, budući da mu se vrijednost mijenja tijekom rada i u nekim slučajevima može dovesti do struganja rotora o paket statora.

Iznos dinamičkog ekscentriciteta od 20 % znači da se zračni raspored dinamički smanjuje, odnosno povećava vrtnjom motora, za 20 % nazivne vrijednosti u mirovanju. Minimalna i maksimalna vrijednost zračnog rasporeda određuje se prema izrazima 5-3 i 5-4

$$\delta_{\min} = \delta_0 \left(1 - \frac{\Delta\delta}{100} \right) \quad (5-3)$$

$$\delta_{\max} = \delta_0 \left(1 + \frac{\Delta\delta}{100} \right) \quad (5-4)$$

Postojanje ekscentriciteta zračnog rasporeda, u frekvencijskom spektru statorsche struje, stvara dodatne komponente [2], [3] koje su dane izrazom 5-5:

$$f_{\text{eksc}} = f_1 \cdot \left[(k \cdot N_R \pm n_d) \frac{1-s}{p} \pm n_{vh} \right] \quad (5-5)$$

gdje su:

- f_1 - frekvencija napona napajanja
- k – bilo koji cijeli broj
- N_R - broj rotorskih utora
- n_d - stupanj ekscentriciteta; 0 za statički, 1 za dinamički
- s - klizanje
- p - broj pari polova
- n_{vh} broj vremenskog harmonika (1, 3, 5, 7,...)

Frekvencijske komponente koje se pojavljuju kao posljedica statičkog ekscentriciteta jednake su frekvencijama utorskih harmonika. Dinamički ekscentricitet stvara dodatne komponente frekvencijskog spektra u području oko utorskih harmonika.

Razina dozvoljenog ekscentriciteta zavisi o konstrukciji stroja te o pogonskim uvjetima u kojima stroj radi. Uobičajeno se uzima da je 20% ekscentriciteta dozvoljeno a pri vrijednostima od 50% potrebno je zaustaviti pogon.

5.5. Detekcija kvarova rotorskog kaveza analizom spektra statorsche struje

Kada je statorski namot trofaznog asinkronog stroja napajan trofaznim simetričnim naponom, u zračnom se rasporedu stroja stvara okretno polje, koje rotira sinkronom brzinom u odnosu na stator [13]. U slušaju kada je stroj simetričan ne postoji inverzna komponenta okretnog polja. Statorsko okretno polje u rotorskom namotu inducira napon, čija je frekvencija ovisna o brzini vrtnje rotora, odnosno o klizanju i određena je izrazom:

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad (5-6)$$

gdje su: s – klizanje i

f_1 – frekvencija statorskog napona.

Kao posljedica induciranog napona, rotorskim namotom poteku struje, koje stvaraju rotorsko okretno polje. Ono, u odnosu na rotor, rotira brzinom $n_s \cdot s$. U slučaju kada je rotorski namot (kavez) simetričan u rotorskom okretnom polju postoji samo direktna komponenta. Ukoliko se u rotorskom kavezu pojavi nesimetrija iz bilo kojeg razloga, zbog pucanja jednog štapa na primjer, u okretnom polju rotora pojavljuje se i inverzna komponenta. Inverzna komponenta rotira brzinom klizanja u odnosu na rotor ali u suprotnom smjeru. Kao rezultat ovog protjecanja u statorskom se namotu inducira napon i struja na frekvenciji:

$$f_{bh} = f_1(1 - 2s) \quad (5-7)$$

Ovakve oscilacije struje, nepoželjne su za mrežu. Dodatne komponente struje, na frekvenciji dvostrukog klizanja, uzrokuju ujedno i pulsiranje momenta dvostrukom frekvencijom klizanja ($2sf_1$), što se odražava i na brzini. Oscilacije brzine djelomično smanjuju amplitudu komponente na frekvenciji $f_1(1-2s)$, ali se zbog njih pojavljuje dodatna komponenta na frekvenciji $f_1(1+2s)$ [13]. Viši je harmonik dodatno pojačan trećim vremenskim harmonikom toka. Oba harmonika ovise i o tromosti stroja. Prema tome slomljeni rotorski štapovi u spektru struje stvaraju dodatne harmonike na frekvencijama danim izrazom:

$$f_{bh} = f_1(1 \pm 2s) \quad (5-8)$$

Promatranjem veličine dodatnih harmonika moguće je otkriti kvarove rotorskog kaveza u najranijoj fazi. U stvarnosti se dodatne komponente pojavljuju i na višim harmonicima osnovnih bočnih harmonika [23], pa izraz poprima oblik:

$$f_{bh} = f_1(1 \pm 2ks) \quad (5-9)$$

Iznos bočnih harmonika osim što ovisi o stupnju kvara rotora ovisi o još nekoliko faktora, koje je potrebno uzeti u obzir prilikom dijagnostike. To su [13]:

- izvedba rotorskog kaveza – na rezultate spektralne analize mogu utjecati na primjer različite izvedbe rotorskog kaveza, različito izvedeni spojevi štapova ili prstena,

- snaga stroja – iznosi bočnih harmonika, za istu razinu kvara mogu se razlikovati ovisno o veličini stroja,
- iznos tereta – spektar struje znatno se mijenja ovisno o veličini struje tereta,
- mehaničke karakteristike tereta – karakter tereta (na primjer vremenski promjenjivi tereti) može u spektru struje izazvati pomak harmonika,
- mehaničke komponente uzrokovane prijenosnim mehanizmom – prijenosni mehanizam često u spektru struje stvara dodatne harmonike.

Zbog svih ovih razloga, analizu spektra struje treba provoditi oprezno. Dodatni se problemi pojavljuju u slučajevima strojeva kod kojih rotorski štapovi nisu izolirani od rotorskog paketa. U tim slučajevima, posebice kada je kontakt između štapova i paketa dobar, javljaju se struje među štapovima (kroz željezo rotora). Pojava tih struja može analizu učiniti nepouzdanom. Iz tih se razloga preporučuje, kada je moguće, a posebice kod manjih strojeva, dijagnostiku provjeriti nekom dodatnom metodom, na primjer analizom spektra brzine vrtnje [23], [27]. Iskustva iz stvarnih pogona pokazuju [24], [13] da se u nekim specifičnim pogonima (npr. pogon drobilice kamena) mogu pojaviti dodatni bočni harmonici, koji se mogu zamijeniti za harmonike nastale zbog slomljenih štapova. Jednako tako, i specifična konstrukcijska rješenja rotora mogu uzrokovati bliske harmonike. Svi ovi slučajevi trebali bi se uzeti u obzir prilikom razvoja dijagnostičkog sustava.

Osim frekvencija određenih izrazom 5-9 u spektru se statorske struje, asinkronog motora sa oštećenim rotorom, mogu uočiti i frekvencije dane izrazom [23], [31]

$$f_{bh} = \left[\left(\frac{k}{p} \right) (1-s) \pm s \right] f_1 \quad (5-10)$$

gdje su: f_1 - frekvencija napona mreže
 k - bilo koji cijeli broj (harmonički član) 1, 2, 3, ...
 s - klizanje
 p - broj pari polova

Frekvencije dane izrazom 5-10 mogu se uočiti i u spektru napona induciranog u svitku na vanjskoj strani motora (opširnije u 6.6.1) [23].

Iznos bočnih harmonika ovisi o stupnju oštećenja rotorskog kaveza. Naime, u slučaju kada je oštećeno više štapova, bočni će harmonici biti veći. Omjer vrijednosti bočnog harmonika i osnovnog harmonika u ovisnosti o broju puknutih štapova dan je izrazom 5-11 prema [28]:

$$A_s = \frac{\sin \alpha}{2p(2\pi - \alpha)} \quad (5-11)$$

gdje su: $\alpha = \frac{2\pi n_p p}{N_2}$

- A_s - omjer vrijednosti bočnog i osnovnog harmonika
 n_p - broj puknutih štapova
 N_2 - broj štapova kaveza
 p - broj pari polova

U stvarnim uvjetima, omjer iznosa bočnih harmonika i osnovnog harmonika je vrlo mali. Takvi omjeri daju nepregledne slike spektara iz kojih je nemoguće donijeti sud o stanju stroja. Zbog toga se spektar prebacuje u daleko pogodniji logaritamski prikaz, u kojem su vrijednosti pojedinih harmonika prikazani u dB. U praksi su vrijednosti bočnih harmonika (u odnosu na osnovni harmonik) uobičajeno 30dB do 70dB. Za prebacivanje vrijednosti u dB koristi se izraz 5-12.

$$A = 20 \cdot \log A_s \quad (5-12)$$

Ako se u izraz 5-11 uvrste vrijednosti harmonika u dB i vrijednost α , dobiva se izraz 5-13, pomoću kojega se može procijeniti broj puknutih štapova, zavisno o vrijednosti bočnih harmonika u dB.

$$n_p = \frac{2 \cdot N_2}{10^{\frac{A}{20}} + 2p} \quad (5-13)$$

U sklopu rada izrađena je aplikacija za snimanje i spektralnu analizu struje motora. Izvršena su snimanja na različitim strojevima, za različite stupnjeve kvara i na različitim opterećenjima. Snimljene pojave iskorištene su za provjeru izraza 5-13. Eksperimentalna iskustva nekih autora [28], pokazuju da izraz 5-13 daje nešto manju vrijednost očekivanog broja puknutih štapova od stvarne. Snimanjima je i to provjereno. Iz literature je poznato [13], [24], [28] da vrijednosti bočnih harmonika, u slučaju nekog stanja kaveza stroja, ovise i o opterećenju stroja. Točnije, vrijednost bočnih harmonika u odnosu na osnovni harmonik se smanjuje pri manjim opterećenjima. Kako je, u ovom radu, izvršen veliki broj snimanja stroja za različite stupnjeve oštećenja i različita opterećenja stroja, provjerena je i ova ovisnost. Pored toga sva su snimanja izvršena za slučaj napajanja stroja na krutoj mreži te za slučaj napajanja preko frekvencijskog pretvarača. Prikaz izrađene aplikacije, te pregled rezultata dani su u poglavlju 6.

6. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Eksperimentalna su istraživanja provedena u laboratoriju električnih strojeva Zavoda za elektrostrojarstvo i automatizaciju. Istraživanja su provedena na asinkronom kaveznom stroju proizvodnje Končar, snage 22 kW. Cilj je snimanja bilo ustanoviti kako se iznosi bočnih harmonika mijenjaju u ovisnosti o stupnju oštećenja i opterećenju stroja. U tu je svrhu stroj ispitan za pet različitih stupnjeva namjerno izazvanih kvarova. U svakom stanju stroj je ispitan za različita opterećenja, od praznog hoda do 120% opterećenja. Izvršena su snimanja i analize statorsche struje, rasipnog toka i osovinskog napona. Ispitivanja analizom statorsche struje provedena su pri radu stroja na krutoj mreži i pri radu na frekvencijskom pretvaraču.

6.1. Sustav za ispitivanje

6.1.1. A/D kartica – DAS 50

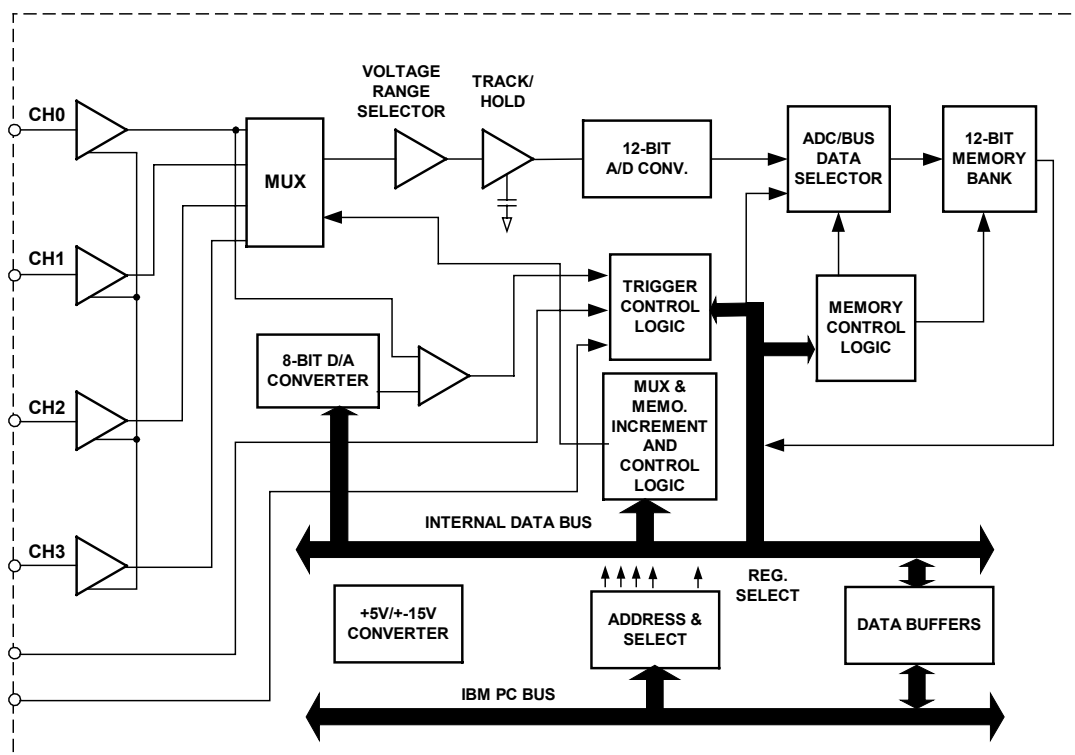
DAS50 je 12-bitni A/D pretvarač (kartica) proizvođača Keithley Metrabyte. Namijenjen je korištenju u IBM PC/XT/AT kompatibilnim računalima u koja se ugrađuje putem ISA utora. Kartica može vršiti pretvorbu brzinom 1M uzoraka/s, i na sebi raspolaže sa do 2 MB memorije. U slučaju kada je ugrađena kompletna memorija, moguće je snimiti milijun uzoraka prije prebacivanja podataka u računalu. Kartica raspolaže sa 4 analogna ulaza. Visinu ulaza moguće je programski odabirati i postoji nekoliko različitih vrijednosti; 0 do +5V, 0 do +10V, $\pm 2.5V$, $\pm 5V$ i $\pm 10V$.

DAS50 pretvarač namijenjen je brzim snimanjima. Snimanje se može sinkronizirati internim satom ili vanjskim signalom. U slučaju korištenja internog sata moguća je pretvorba u granicama 137 Hz do 1 MHz. Okidanje (*trigger*) se može izvršiti na tri načina: programski izdavanjem komande, vanjskim digitalnim signalom ili podesivom vrijednosti vanjskog analognog signala. U slučaju korištenja vanjskog analognog signala, uzima se signal na kanalu 0, a može se odabrati između pozitivnog ili negativnog brida.

Podaci se mogu snimati nakon okidanja (*post-trigger*) i u tom slučaju snimanje se pokreće nakon dobivanja signala. Druga je opcija da se podaci kontinuirano snimaju (*trace about trigger*), te se nakon dobivanja okidnog signala vrši zapis N uzoraka (kod ovakvog načina snimanja moguće je analizirati podatke prije i poslije okidanja). Zadnja je mogućnost snimanje signala do trenutka okidanja, kada se snimanje zaustavlja (*pre-trigger*).

DAS 50 kartica standardno je podržana od strane programa TestPoint.

Principijelni blok dijagram A/D pretvarača dan je na slici 6-1



Sl. 6-1 Principijelni blok dijagram A/D pretvarača DAS 50

6.1.2. Programski paket TestPoint

Programski paket TestPoint namijenjen je izradi aplikacija za akviziciju (prikupljanje) podataka, njihovu obradu i prezentaciju. Program je od neovlaštenog korištenja zaštićen ključem, bez kojega je rad u programu moguć ali ne postoji mogućnost snimanja izrađenog programa. Za korištenje izrađene aplikacije nije potreban ključ.

Korištenjem programa moguće je izrađivati različite aplikacije za vlastite potrebe kao i za daljnju distribuciju. Naime, jednom napravljen program, nakon testiranja i završnih uređivanja može se distribuirati kao zasebna aplikacija. Tako dobivenu aplikaciju moguće je instalirati i na računalu na kojem nije prethodno instaliran programski paket TestPoint. Na tom računalu aplikacija radi istovjetno onome na kome je program i napravljen, s jedinom razlikom da ju nije moguće mijenjati niti ulaziti u sam kod programa. Prednost je takvog rada da je moguće izraditi aplikacije različite namjene koje nakon toga korisnici mogu koristiti i u slučaju da se nikada nisu susreli sa programskim paketom TestPoint.

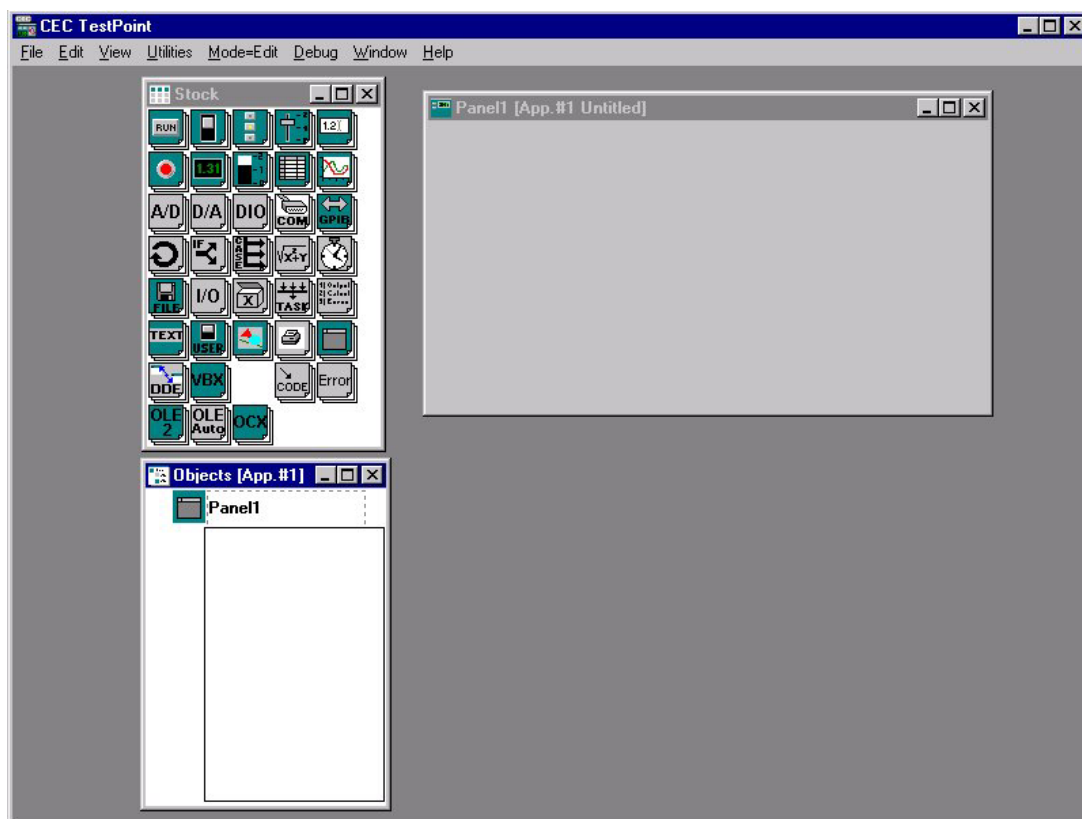
U sklopu ovog teksta pažnja će ipak biti posvećena samoj izradi programa odnosno procesu izrade završne aplikacije.

Programski paket TestPoint u sebi sadrži kontrole za upravljanje vanjskim uređajem, matematičke funkcije za rad sa varijablama, vektorima, matricama, funkcije za kreiranje korisničkih sučelja, izradi protokola mjerenja i gotove rutine za razmjenu i korištenje

podataka iz drugih Windows aplikacija. Program u sebi ima ugrađenu bazu nekoliko stotina najraširenijih instrumenata, podršku za GPIB (IEEE-4888), RS232 i RS485 uređaje. Za prikupljanje podataka podržane su analogne i digitalne (A/D i D/A) kartice, digitalne ulazno/izlazne kartice, brzi A/D pretvarači. Za prikaz rezultata mogu se koristiti grafovi, numerički displeji, stupčasti prikazi i grafički prikazi u obliku analognih instrumenata sa kazaljkom. Postoji mogućnost limita pojedinih signala, blokada alarma itd. Za analizu podataka na raspolaganju su filtri, spektralna analiza (FFT), zaglađivanja i usrednjavanja krivulja. Pri obradi krivulja na raspolaganju su aproksimacije (interpolacije) pravcima, polinomima, eksponencijalama. Program posjeduje i statističke operacije. Za komunikaciju sa korisnikom koji će koristiti završnu aplikaciju na raspolaganju su sklopke, tipkala, klizači, polja za unos podataka.

Programiranje je u TestPoint-u realizirano korištenjem gotovih objekata, koji se koriste tzv., *drag-and-drop* metodom. Međusobnim povezivanjem objekata izrađuje se aplikacija.

Osnovni se ekran sastoji od tri dijela:



Sl. 6-2 Osnovni prozor programskog paketa TestPoint

Skladište (engl. *Stock*) –predstavlja skup objekata raspoloživih za izradu aplikacija. Izgled skladišta prikazan je na slici 6-3. Korisnik odvlačenjem objekata na radni panel ili u prozor

Objects. Tako iskorišteni objekti grade završnu aplikaciju. Postoji nekoliko osnovnih tipova objekata:

- a) izvršni objekti: namijenjeni su izvršavanju niza naredbi (procedura). Posjeduju *Action* listu. Unutar ovih objekata kreiraju se pojedini dijelovi programa.
- b) funkcijski objekti: namijenjeni su izvršavanju pojedinih funkcija (operacija). Operacije mogu biti matematičke, logičke, analitičke. Izvršavanje ovih objekata pokreće se u *Action* listama izvršnih objekata.
- c) varijable i konstante: ne izvršavaju nikakve operacije. Služe za postavljanje vrijednosti određenih parametara. Vrijednosti im se mogu promijeniti unutar *Action* lista, bilo kada tijekom izvođenja programa.
- d) objekti za prikaz, iscertavanja i ispis poruka

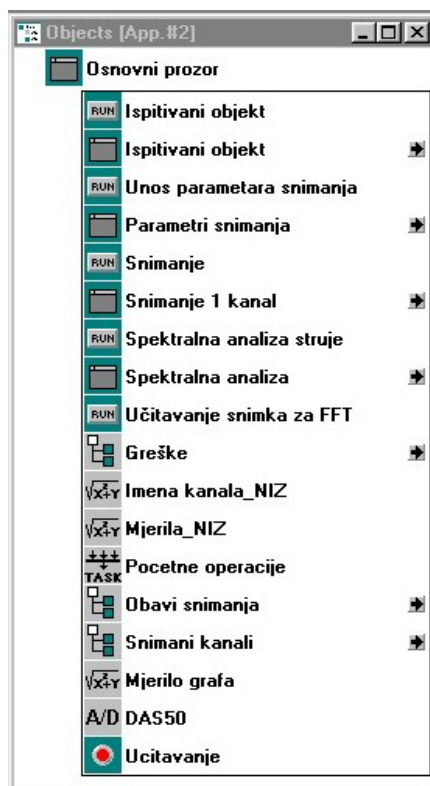


Sl. 6-3 Skladište objekata programskog paketa TestPoint-a (engl. *Stock*)

Panel – osnovni ekran u kojem se slažu objekti koji se vide u konačnoj aplikaciji. Objekti se iz skladišta odvlače mišem na panel. Raspored pojedinih objekata na panelu odgovara onome kakav će biti u konačnoj aplikaciji. Na panelu se slažu tipkala, grafikoni, displeji itd. Korisnik pomoću miša pokreće i mijenja pojedine objekte na panelu.

Objekti (engl. *Objects*) – ovo je prozor u kojem su smješteni svi objekti koji su upotrijebljeni. Izgled prozora prikazan je na slici 6-4. Tu su smješteni objekti koji su vidljivi na panelu ali i oni koji se ne vide poput matematičkih funkcija, petlji, uvjeta itd. Prilikom izrade programa objekti se odvlače iz prozora i postavljaju u *Action* listu nekog izvršnog objekta. Kad se određeni objekt odvuče, program nudi izbor neke od unaprijed definiranih naredbi. Naredbe se razlikuju za svaki tip objekta. Pisanje programa svodi se na izbor jedne

od naredbi. Ovakvim načinom pojednostavljena je izrada programa i izbjegnuto klasično pisanje koda, što ujedno i smanjuje mogućnost pogreške. Radi bolje preglednosti unutar prozora *Objects* moguće je objekte grupirati u grupe.



Sl. 6-4 Izgled prozora upotrijebljenih objekata

Za svaki upotrijebljeni objekt moguće je definirati nekoliko parametara:

- Settings* – definiraju se osnovna podešenja objekta kao izgled, boja, okviri, početne vrijednosti i imena.
- Actions* – predstavlja listu naredbi koje se izvršavaju aktivacijom nekog objekta. Objekti se mogu aktivirati neposredno od strane korisnika ili posredno unutar programa kada se ispune određeni uvjeti. Unutar *Actions* liste gradi se jezgra programa. *Action* listu imaju samo izvršni objekti.
- Comments* – omogućava upisivanje bilo kakvih tekstualnih komentara. Ne utječe na rad i služi samo za lakše razumijevanje programa.
- X_{Ref} – predstavlja listu veza pojedinog objekta sa ostalim objektima. Služi za jednostavnije praćenje i analizu programa.

6.1.3. Lista objekata upotrijebljenih u izradi aplikacija



Objekt tipkala (engl. *Pushbutton Object*) – objekt predstavlja sučelje pomoću kojega korisnik pokreće izvršavanje određenih radnji. Kada korisnik mišem klikne na tipkalo pokreće se lista radnji pridružena tipkalu. U programima se pomoću ovog objekta pokreću snimanja, učitavanja i spremanja podataka, odabire način grananja programa.



A/D objekt (engl. *Analog/Digital Object*) – objekt omogućava rad sa korištenim A/D pretvaračem. U programskom paketu TestPoint omogućeno je korištenje do 4 pretvarača. Putem objekta definira se frekvencija uzorkovanja, broj uzoraka koje je potrebno prikupiti, vrši se pokretanje i zaustavljanje snimanja te vrši odabir snimanih kanala. Pomoću ovog objekta u programu su definirani parametri kartice DAS 50.



Objekt grananja (engl. *Case Object*) – objekt omogućuje grananje programa zavisno o rezultatu određenog uvjeta. Objekt je definiran nekom operacijom koja može poprimiti više od jedne vrijednosti. Grananje se vrši zavisno o vrijednosti operacije. Objekt je u razvijenim programima iskorišten za odabir broja snimanih kanala, odabir pojedinog snimanog kanala ili više različitih parova kanala.



Objekt unosa vrijednosti (engl. *Data Entry Object*) – putem ovog objekta korisnik može upisivati vrijednosti određenih parametara. Program ima mogućnost postavljanja početnih vrijednosti objekta, koje korisnik može proizvoljno mijenjati (ukoliko se nakon upisa pritisne tipka Esc, vraća se prethodna vrijednost). U programu je objekt iskorišten za upis parametara stroja, parametara snimanja, vrijednosti parametara prikaza spektra struje, kao i upis eventualnih napomena.



Objekt prikaza podataka (engl. *Display Object*) – objekt služi za prikaz podataka. Podaci mogu biti bročani ili slovni. Korisnik nema mogućnost izmjene vrijednosti objekta. U programima je objekt iskorišten za prikaz vrijednosti struja, dobivenih vrijednosti harmonika, vremena snimanja itd.



Objekt rada sa pogreškama (engl. *Error Handler Object*) – u slučaju pojavljivanja pogrešaka u radu programa (pogrešan format upisanih podataka, nedozvoljene vrijednosti parametara stroja) pomoću ovog objekta moguće je definirati poruke koje se daju korisniku. Time se pojašnjava nastali problem.



Objekt rada sa datotekama (engl. *File Object*) – objekt je namijenjen radu sa datotekama. Korištenjem ovog objekta učitavaju se podaci sa diska i spremaju na disk. Pri snimanju datoteka moguće je proizvoljno kreirati imena kao i ekstenzije datoteka, a moguće je definirati i tip učitavanih podataka.. U programu je objekt iskorišten za spremanje parametara stroja i parametara snimanja na disk, te za spremanje snimljenih veličina za kasniju obradu. Datoteke sa parametrima imaju nastavak (ekstenziju) .txt, a datotekama sa snimljenim podacima pridružuje se nastavak .dat. Obje datoteke spremljene su u tekstualnom formatu.



Objekt grafa (engl. *Graph Object*) – objekt služi za iscrtavanje grafova. Postoji mogućnost iscrtavanja grafova nakon što su prikupljene sve željene točke ili do crtavanje točaka tijekom snimanja. U razvijenim programima korištena je isključivo opcija iscrtavanja grafa nakon što su snimljene sve točke. Pomoću ovog objekta moguće je iscrtavati nekoliko tipova grafova. linijski (*line*), strip (*strip chart*), stupčasti (*bar*) i XY parovi (*XY pairs*). U radu su korišteni grafovi linijskog tipa i XY parovi. U slučaju prikaza linijskog tipa grafa, prikazuje se određena veličina tako da se na X osi nalaze točke. Taj tip grafa iskorišten je za prikaz pojedinog snimka po završetku snimanja. Ukoliko se na X osi želi umjesto točaka očitavati na primjer vrijeme potrebno je korigirati X os, zavisno o frekvenciji snimanja. XY prikaz korišten je da bi se prikazao spektar struje. Naime rezultat FFT-a je niz točaka koje predstavljaju amplitudu pojedinog harmonika i drugi niz točaka koje prikazuju frekvenciju. Da bi se dobila ovisnost amplituda o frekvenciji, potrebno je iscrtati graf tako da se na osi X nanese vrijednosti frekvencija a na os Y amplituda. Važno je uzeti u obzir da je kod takvog načina prikaza nužno da obje varijable imaju isti broj točaka.



Uvjetni objekt (engl. *Conditional Object*) – objekt koji je ekvivalent standardnoj IF naredbi. Zavisno o rezultatu nekog uvjeta koji može biti logička ili aritmetička operacija ili neka usporedba, koja može poprimiti vrijednost logičkih 1 ili 0. Kod definiranja uvjeta dozvoljeno je niz matematičkih i logičkih operacija. U programu je iskorišten za odabir snimanja parametara u novu ili postojeću datoteku, provjeru vrijednosti korisnosti itd.



Objekt signalizacije (engl. *Indicator Object*) – objekt je izlaznog tipa. Služi za indikaciju rezultata neke logičke operacije (1/0, da/ne, trajanje/kraj...). Objekt je u

programima iskorišten za signalizaciju završetka snimanja, snimanja podataka na disk te za signalizaciju da je izračunavanje FFT-a u tijeku.



Objekt petlje (engl. *Loop Object*) – objekt se koristi kada se neka operacija mora izvršavati ciklički. Broj ponavljanja petlje moguće je odrediti na više načina: broj ponavljanja određen linearnim nizom sa proizvoljnim korakom, geometrijskim nizom, do ispunjena nekog uvjeta (REPEAT – UNTIL), ili dok je neki uvjet ispunjen (WHILE).



Objekt izračunavanja (engl. *Math Object*) – pomoću ovog objekta mogu se vršiti bilo kakve matematičke ili logičke operacije. Programski paket TestPoint ima mogućnost rada sa varijablama, brojevima, vektorima, matricama. Podržava trigonometrijske funkcije, filtriranje, derivacije, interpolaciju funkcija, generiranje vlastitih funkcija proizvoljnog oblika.



Objekt prozora (engl. *Panel Object*) – osnovni objekt za izradu aplikacija. U programu se može otvoriti proizvoljni broj prozora, koji se tijekom izvođenja programa "otvaraju" i "zatvaraju". Ostali ulazno/izlazni objekti (osim matematičkih operacija) slažu se na prozore, čime se daje izgled konačnoj aplikaciji



Objekt za odabir (engl. *Selector Object*) – objekt korisniku omogućuje odabir između više unaprijed ponuđenih opcija. Može biti izveden u dva oblika: kao padajući meni i kao stupac "tipki". U programu su korištene obje izvedbe, za odabir kanala koji će se snimati i davanje imena kanalima.



Objekt klizača (engl. *Slider Object*) – objekt se koristi za kontinuirano mijenjanje određene veličine od strane korisnika. Objekt je grafički izveden u obliku klizača. Vrijednosti se mogu mijenjati ručno ili pomicanjem klizača. U programu je objekt iskorišten za pomicanje kursora prilikom traženja dodatnih harmonika u spektru struje.



Objekt sklopke (engl. *Switch Object*) – objekt omogućava korisniku odabir između dvije unaprijed ponuđene vrijednosti. U programu korisnik putem ovog objekta odabire hoće li se brzina vrtnje procjenjivati iz opterećenja ili mjeriti osciloskopom (moguće samo u laboratorijskim uvjetima).



Objekt procedure (engl. *Task Object*) – objekt omogućava izvođenje niza operacija pozivanjem jedne naredbe. Koristan je u slučajevima kada se veći broj operacija treba

izvoditi više puta u programu. U razvijenim programima iskorišten je za proceduru iscrtavanja grafova. Time je omogućeno da se pri promjeni bilo kojeg parametra grafa (granice prikaza, podjela po osima...) iscrtavanje novog grafa obavi putem jedne naredbe (pokretanjem procedure).



Tekstualni objekt (engl. *Text Object*) – objekt omogućuje ispisivanje tekstualnih poruka na panelima. Moguće je mijenjati font, veličinu i boju slova.

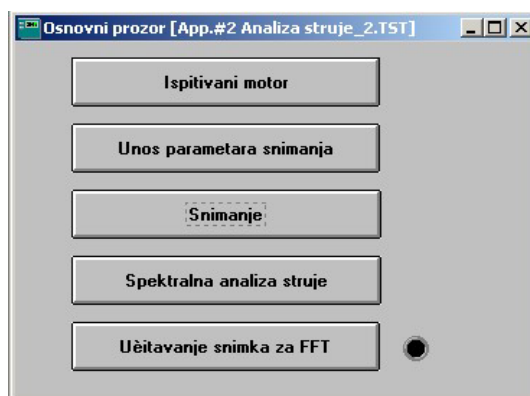


Vremenski objekt (engl. *Time Object*) – objekt omogućuje isčitavanje sistemskog vremena i postavljanje vremenskih pauza u programu. Iskorišten je za dobivanje podataka o vremenu i datumu snimanja.

6.1.4. Opis razvijene aplikacije za snimanje i analizu statorske struje

U sklopu ovog rada napravljene su tri odvojene aplikacije. Prva je namijenjena isključivo snimanju jednog do četiri kanala, te spremanju snimljenih podataka na disk. Ta je aplikacija iskorištena za snimanja zaleta i zaustavljanja asinkronog stroja. Druga aplikacija ima mogućnost snimanja jednog kanala (uz mogućnost izbora kanala koji se želi snimati). Osim snimanja moguće je učitavati prethodno snimljene snimke i prikazivati ih. Snimljene ili učitane podatke moguće je analizirati u frekvencijskoj domeni (FFT), uz mogućnost odabira područje prikaza spektra snimka. Ne postoji mogućnost automatskog očitavanja vrijednosti pojedinih harmonika. Aplikacija je iskorištena za analizu signala ispitnog svitka i za analizu signala osovinskog napona. Treća aplikacija iskorištena je za snimanje i spektralnu analizu statorske struje. Korisniku se daje mogućnost odabira kanala na kojem se snima struja. Nakon završenog snimanja vrši se Fourierova transformacija snimka, na osnovu koje se vrši analiza stanja. Detaljno je opisana samo aplikacija namijenjena spektralnoj analizi statorske struje. Dijagram toka izrađene aplikacije nalazi se u prilogu E

Nakon pokretanja programa, otvara se osnovni prozor prikazan na slici 6-5.



Sl. 6-5 Osnovni prozor programa za spektralnu analizu

Ovaj prozor predstavlja osnovni izbornik programa. Na njemu korisnik odabire hoće li vršiti snimanje, obrađivati snimak ili učitati prethodno snimljenu pojavu radi daljnje analize.

Učitavanje starog snimka – odabirom ove opcije otvara se prozor putem kojega je moguće učitati stari snimak sa diska. Snimci snimljeni korištenjem ovog programa imaju nastavak ".dat", pa se, stoga, prvo pretražuju snimci sa tim nastavkom. Nakon odabira i učitavanja snimka (crvenim se indikatorom signalizira da je učitavanje u tijeku), program se vraća na početni prozor. Daljnja se obrada odvija kao da je snimak upravo snimljen.

Snimanje novog snimka – odvija se u nekoliko koraka. Kao prvo potrebno je unijeti parametre ispitivanog stroja. Odabir se vrši tipkom "*Ispitivani stroj*", nakon čega je moguće odabrati da li se želi učitati stare podatke o stroju ili upisivati nove. U slučaju da je odabrano učitavanje starih podataka potrebno je odabrati željenu datoteku sa diska. Datoteke sa podacima o stroju imaju nastavak ".txt". Nakon što se odabere datoteka sa parametrima stroja, otvara se prozor prikazan na slici 6-6, u kojem su prikazani osnovni parametri stroja, čime se omogućava provjera učitanih podataka.

The screenshot shows a software window titled "Osnovni prozor: Stroj". It contains eight input fields arranged in two columns, each with a label and a value displayed in green text. At the bottom, there are two buttons: "PRIHVATI" and "ODABERI DRUGU DATOTEKU".

Tip motora:	2 AZ 307-4	cos_φ:	0.88
Snaga motora [kW]:	22	Frekvencija [Hz]:	50
Nazivni napon [V]:	380	Nazivna brzina [r/min]:	1470
Nazivna struja [A]:	42	Vrijeme unosa:	16:03 12/18/01

PRIHVATI ODABERI DRUGU DATOTEKU

Sl. 6-6 Prikaz starih parametara stroja

U ovom je koraku moguće potvrditi odabir parametara ili učitati druge. U slučaju potvrde podataka, otvara se novi prozor (slika 6-7), unutar kojega je moguće mijenjati podatke, dodavati komentare ili mijenjati datoteku u koju će se podaci spremati. U slučaju kada se na početku odabere upis podataka o novom stroju otvara se prozor sa slike 6-7, ali su svi podaci neispunjeni. Nakon upisa ili promjene željenih podataka, moguće je podatke spremiti na disk u novu ili postojeću datoteku. Prilikom spremanja podataka na disk program provjerava da li upisani podaci daju prihvatljive vrijednosti za korisnost ($0.7 < \eta < 1$), vrši provjeru $\cos\varphi$, računa sinkronu brzinu i broj polova, te nazivnu vrijednost klizanja. U slučaju da korisnik nije

upisao vrijednost struje praznog hoda, pretpostavljena vrijednost uzima se 30% nazivne struje. Svi izračunati parametri koriste se kasnije u programu. Pored nazivnih podataka stroja u datoteku se upisuju datum i vrijeme upisa podataka. Spremljenoj datoteci pridružuje se ekstenzija ".txt". Nakon spremanja podatka program se vraća na početni prozor.

The screenshot shows a software window titled "Osnovni prozor:Ispitivani objekt". Inside, there is a section titled "PARAMETRI ISPITIVANOG STROJA:". Below this title, there are several input fields for motor parameters: "Tip motora:" (2 AZ 307-4), "Snaga motora [kW]:" (22), "Nazivni napon [V]:" (380), "Nazivna struja [A]:" (42), "Nazivni cos_phi:" (0.88), "Nazivna brzina [r/min]:" (1470), "Nazivna frekvencija [Hz]:" (50), and "Struja PH (procjena) [A]:" (17). To the right of these fields is a "Datoteka za pohranu:" section with a text box containing "E:\MRVA\...\2AZ307 4.txt" and a "File" button. Below the input fields is a "Napomene (do 150 znakova):" text area. At the bottom right, there are two checkboxes: "Spremi podatke u novu datoteku" (checked) and "Spremi podatke u postojeću datoteku". At the bottom center, there are two buttons: "NASTAVI" and "SPREMI".

Sl. 6-7 Prozor za unos parametara ispitivanog stroja

Nakon upisivanja nazivnih podataka ispitivanog stroja, upisuju se parametri snimanja. U prozoru parametara snimanja unosi se frekvencija snimanja, trajanje snimka i odabire snimani kanal (putem padajućeg izbornika). Izgled prozora za unos parametara snimanja prikazan je na slici 6-8.

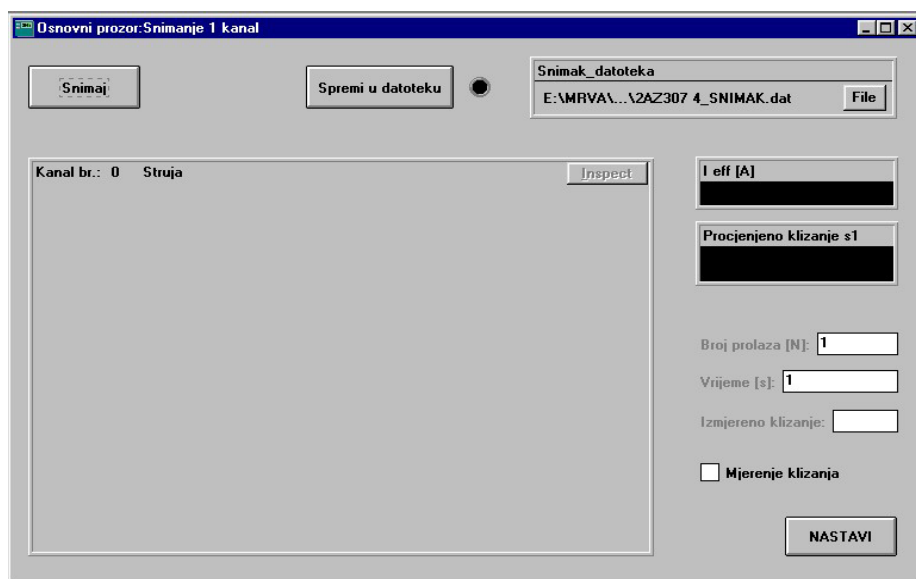
The screenshot shows a software window titled "Osnovni prozor:Parametri snimanja". Inside, there are several input fields and dropdown menus for recording parameters: "Snimaj kanal [1]:" (0), "Frekvencija snimanja [Hz]:" (1000), "Vrijeme snimanja [s]:" (2), "Kanal 0:" (Struja), "Kanal 1:" (Struja), "Kanal 2:" (Struja), "Kanal 3:" (Struja), "Mjerilo CH0:" (1), "Mjerilo CH1:" (1), "Mjerilo CH2:" (1), and "Mjerilo CH3:" (1). At the bottom right, there is a button labeled "NASTAVI".

Sl. 6-8 Prozor za unos parametara snimanja

Točnost Fourierove transformacije ovisi o ovdje upisanim parametrima. Frekvencija snimanja određuje granice u kojima će biti izračunata Fourierova transformacija. Naime, maksimalna frekvencija koju je moguće prikazati u frekvencijskoj domeni jednaka je polovini frekvencije snimanja. Kao polazna vrijednost u programu se uzima 1kHz, čime je određena maksimalna prikazana frekvencija od 500 Hz. Kako se bočni harmonici javljaju na frekvencijama bliskim frekvenciji mreže od 50 Hz, ova vrijednost je dovoljna. Drugi je važan parametar trajanje snimaka. Duljina trajanja snimka određuje osnovni harmonik Fourierove transformacije. To znači da trajanje snimka od 100 s određuje vrijednost osnovnog harmonika 0.01 Hz. Kako su sve ostale frekvencije viši harmonici osnovnog harmonika, ovime je određena rezolucija prikazanog spektra. Pomak bočnih harmonika u odnosu na osnovni harmonik mreže proporcionalan je klizanju stroja. Kako su vrijednosti klizanja u radu male (reda veličine 0.01) potrebna je velika rezolucija snimka da bi ih se moglo točno odrediti. Iz tih se razloga kao početna vrijednost uzima snimak trajanja 100 s. Da bi se Fourierova transformacija mogla točno provesti korištenjem računala, potrebno je da broj snimljenih točaka bude potencija broja 2. Program na osnovu frekvencije snimanja i upisanog trajanja snimka, određuje broj točaka snimka i produžuje ga da zadovolji taj uvjet. Stoga stvarni snimak ima nešto dulje trajanje od upisanog.

U ovoj se fazi odabire snimani kanal i upisuje mjerilo kanala.

Slijedeći je korak snimanje signala struje za spektralnu analizu. Snimanje se vrši u prozoru prikazanom na slici 6-9.



Sl. 6-9 Prozor za snimanje

Po obavljenom snimanju snimljena se pojava prikazuje unutar prozora (pojava je pomnožena sa upisanim mjerilom tako da se prikazuje snimak u stvarnim vrijednostima), izračunava se i ispisuje efektivna vrijednost snimljene pojave. Na osnovu efektivne vrijednosti procjenjuje se vrijednost klizanja pri tom opterećenju. Vrijednost se klizanja procjenjuje prema izrazu

$$s_1 = s_n \cdot \frac{I_1 - I_0}{I_n - I_0} \quad (6-1)$$

gdje su:

- s_1 - vrijednost klizanja pri snimanom opterećenju
- s_n - vrijednost klizanja pri nazivnom opterećenju
- I_1 - efektivna vrijednost snimljene struje
- I_0 - struja praznog hoda
- I_n - nazivna struja

Kada se stroj ispituje u laboratorijskim uvjetima, postoji mogućnost točnog mjerenja stroboskopom. Mjerenje se vrši brojenjem prolaza označene markice u mjerenom vremenskom razdoblju. Iz broja prolaza i vremena klizanje se određuje prema izrazu 6-2.

$$s [\%] = \frac{2 \cdot N}{T} \quad (6-2)$$

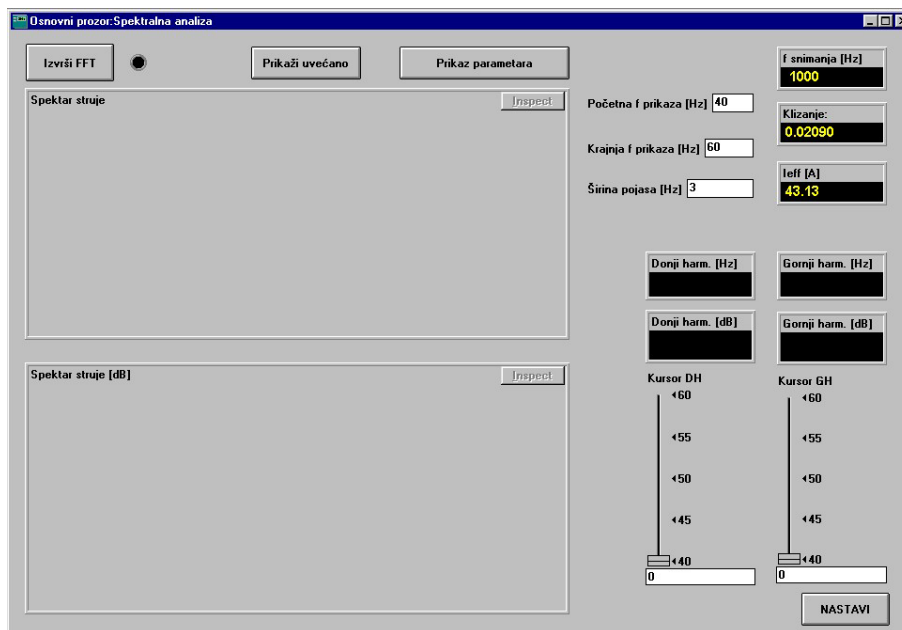
gdje su:

- s - klizanje u %
- N - broj prolaza markice
- T - izmjereno vrijeme

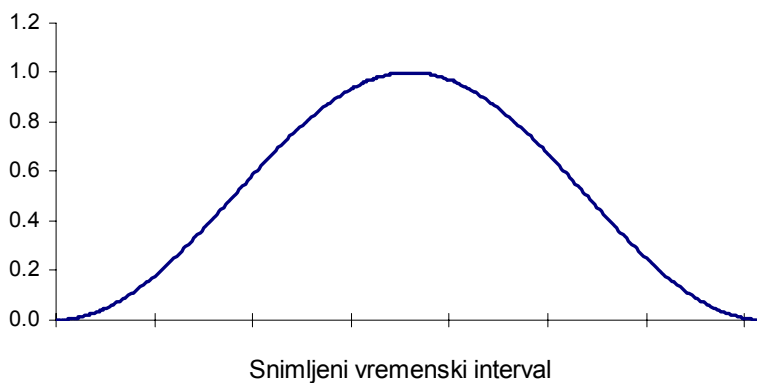
Da bi se, u slučaju mjerenja, klizanje jednostavnije odredilo program ga izračunava, na osnovu upisanog vremena i broja prolaza markice. U slučaju mjerenja klizanja procijenjena se vrijednost zanemaruje. Procijenjeno se ili izmjereno klizanje koristi kao polazna vrijednost za određivanje frekvencijskog pojasa u kojem se traže bočni harmonici. Kada je snimljena pojava zadovoljavajuća, moguće ju je spremiti na disk u proizvoljnu datoteku.

Spektralna analiza struje vrši se u zasebnom prozoru prikazanom na slici 6-10. Moguće je analizirati snimljenu ili učitano pojavu. Spektralna se analiza pokreće tipkom "*Izvrši FFT*". Da bi se Fourierova transformacija točnije izvršila potrebno je snimljenu pojavu prilagoditi korištenjem prozorskih funkcija, kojima se umanjuje efekt rubnih pojava. Naime, snimljena pojava ne počinje i ne završava u nuli, već nekoj vrijednosti koju nije moguće točno odrediti, što smanjuje točnost Fourierove transformacije. Prozorske funkcije amplitude na početku i

kraju snimljene pojave postepeno svode na nulu. Postoji nekoliko tipova prozorskih funkcija: Hanning, Hamming, Blackman Harris, Kaiser. U programu je upotrijebljena Hanning (kosinusna) funkcija. Izgled Hanning funkcije na području snimljenog intervala prikazan je na slici 6-11. Hanning se funkcija može prikazati izrazom [25] 6-3.



Sl. 6-10 Prozor za spektralnu analizu struje



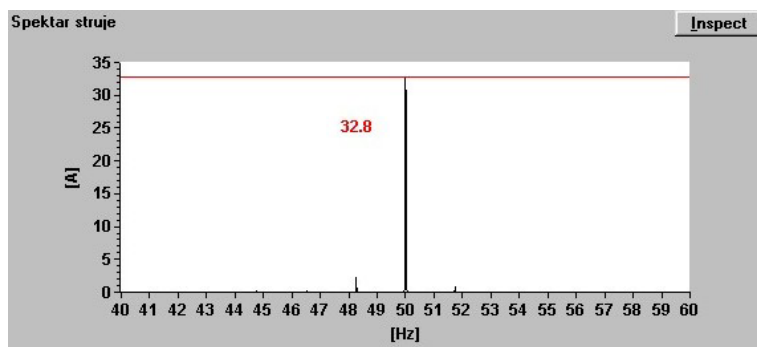
Sl. 6-11 Hanning funkcija

$$0.5 + 0.5 \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{k}{N}\right) \quad (6-3)$$

gdje su: N - broj snimljenih točaka
 k - -N/2 do N/2

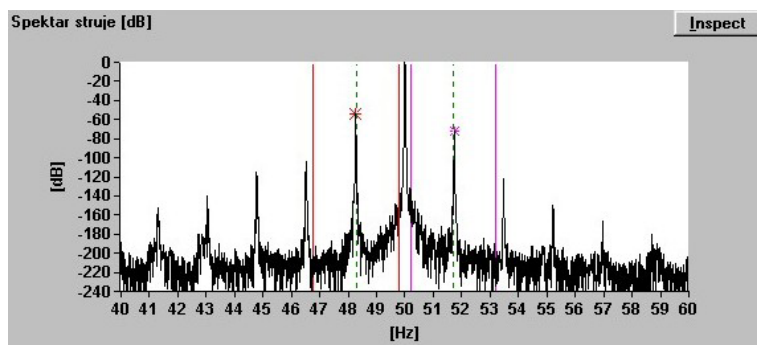
Rezultat su Fourierove analize tri niza podataka (u TestPoint-u se koristi izraz vektori). Prvi predstavlja frekvencije pojedinih harmonika. Raspon dobivenih frekvencija kreće se od 0 do polovine frekvencije snimanja (500 Hz). Drugi vektor predstavlja amplitude, a treći faze pojedinih harmonika.

Rezultat analize prikazuje se na dva grafa, na kojima se daje ovisnost amplitude o frekvenciji. Prvi graf prikazuje vrijednosti pojedinih harmonika u amperima. Kako su vrijednosti bočnih harmonika redovito nekoliko stotina puta manje od osnovnog harmonika, vrijednosti se iz ovog grafa ne mogu očitavati. Spektar struje prikazan u amperima prikazan je na slici 6-12



Sl. 6-12 Spektar struje prikazan u amperima

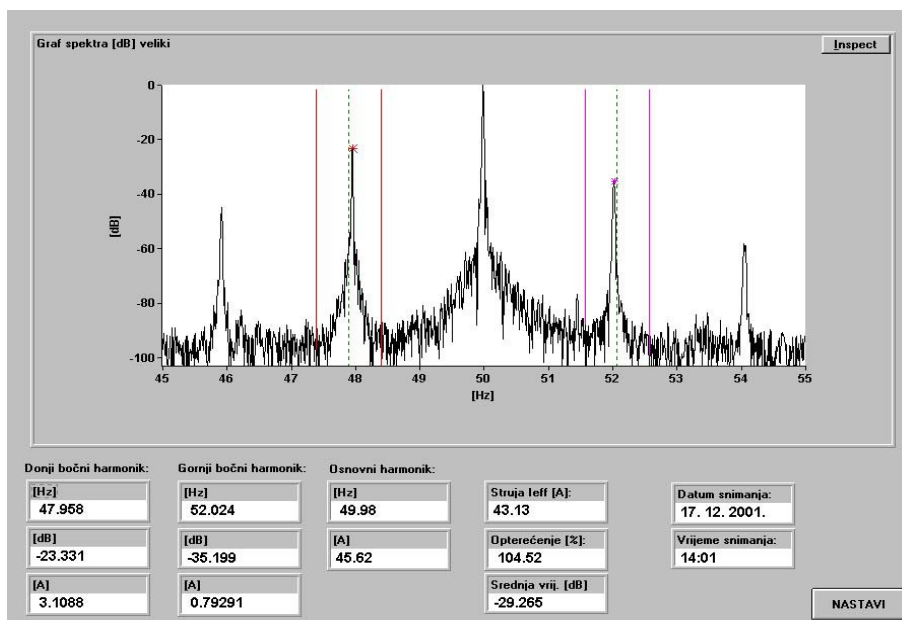
Iz tog se razloga, iscrtava drugi graf u kojem su vrijednosti harmonika prikazane u dB. Vrijednosti se u decibelima određuju prema izrazu 5-12, u kojem se uzimaju omjeri vrijednosti pojedinog harmonika i osnovnog harmonika. Rezultat je graf prikazan na slici 6-13, u kojem se osnovnom harmoniku pridružuje vrijednost 0 dB. Ostali harmonici poprimaju negativne vrijednosti dB.



Sl. 6-13 Spektar struje prikazan u dB

Na osnovu vrijednosti klizanja (procijenjene ili izmjerene), program, na drugom grafu, postavlja pojas u kojem se mogu očekivati bočni harmonici (na slici 6-13 označeno vertikalnim linijama). U postavljenom pojasu traži maksimum i označava ga kursorom. Ako

je vrijednost klizanja dovoljno točno određena, program u većini slučajeva točno označava željene bočne harmonika. U realnim snimanjima procijenjena vrijednost klizanja (snimanje stroboskopom nije moguće) može dosta odstupati od stvarne. U tim slučajevima može se desiti da se bočni harmonik ne nalazi unutar predviđenog pojasa i program odabere pogrešnu vrijednost. Tada, je potrebno ručno odabrati pravu vrijednost bočnog harmonika. Odabir se vrši putem "klizača" na slici. Pomicanjem klizača automatski se mijenjaju prikazane vrijednosti bočnih harmonika, frekvencije harmonika, i klizanja. Nakon odabira harmonika, u posebnom se prozoru prikazuje spektar kao i vrijednosti važne za analizu: vrijednost osnovnog harmonika u amperima, frekvencija osnovnog harmonika, frekvencije bočnih harmonika i njihove vrijednosti u amperima i dB. Izgled prozora sa rezultatima prikazan je na slici



Sl. 6-14 Prikaz rezultata spektralne analize

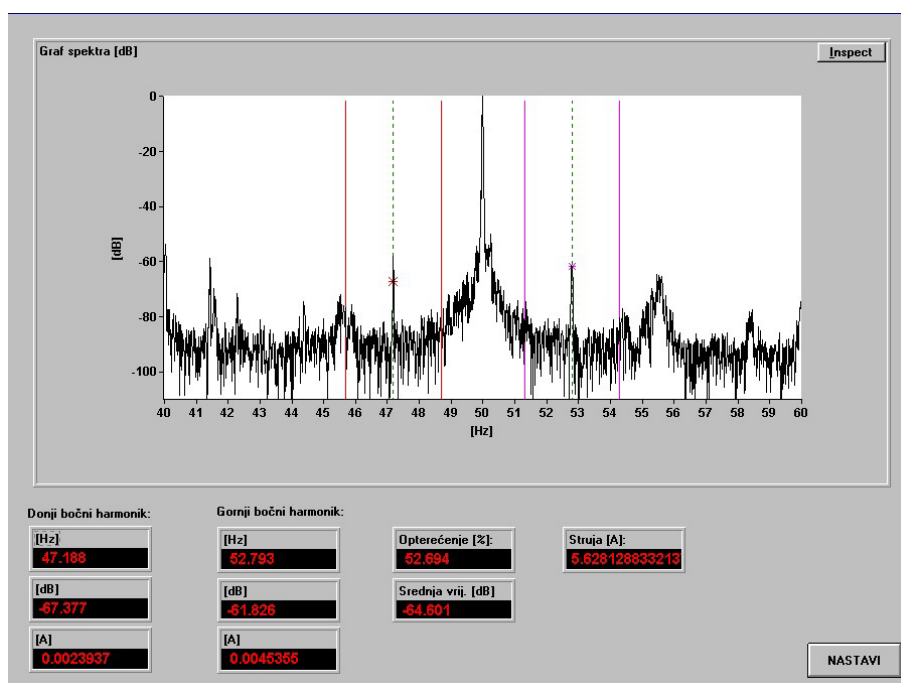
6.2. Podešavanje izrađene aplikacije

Prije ispitivanja stroja od 22 kW program je testiran, provjeren i podešen na manjem stroju slijedećih nazivnih podataka.

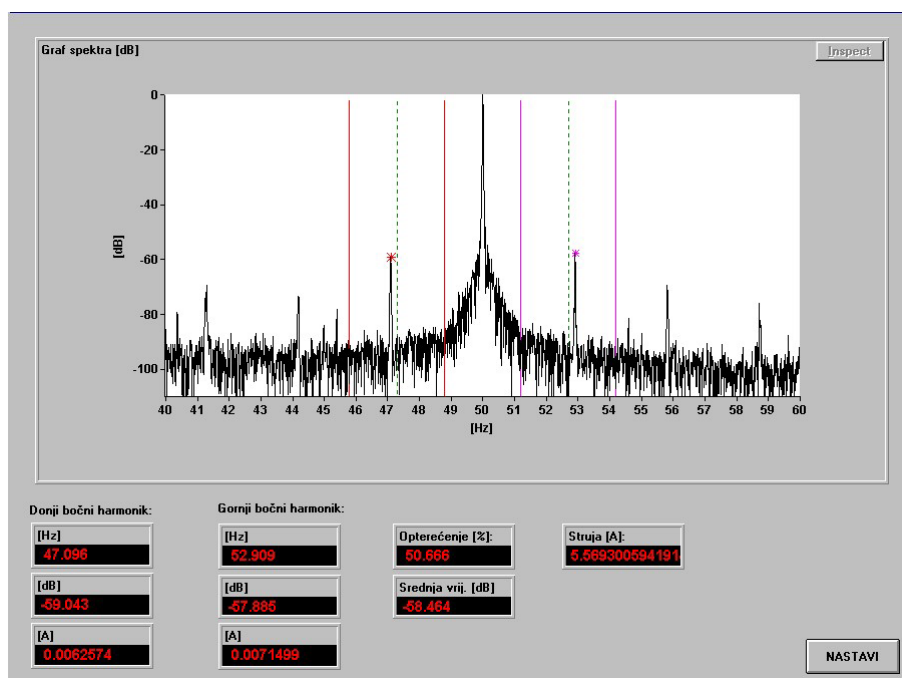
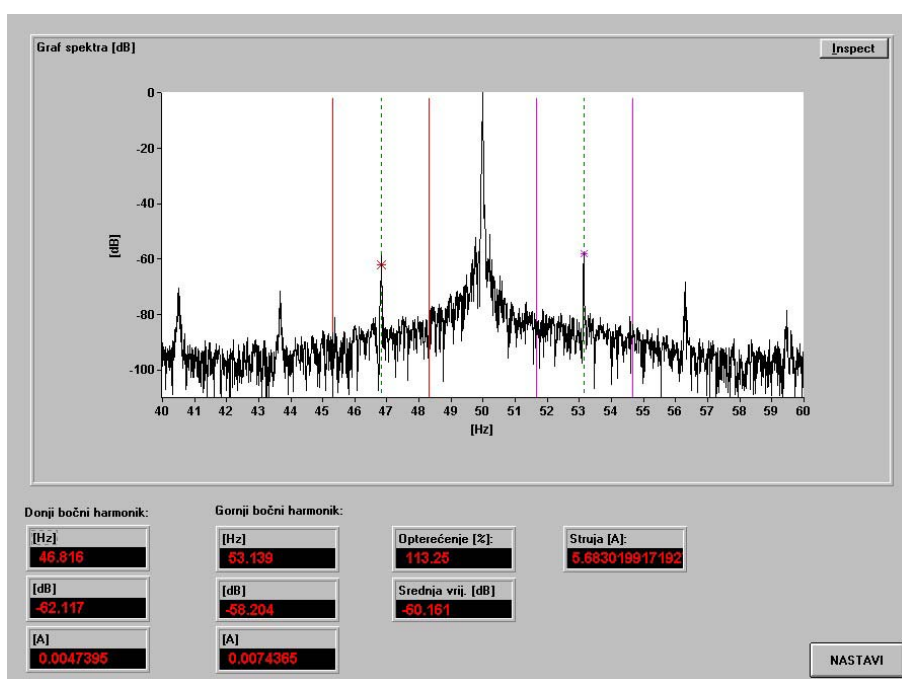
Nazivni podaci asinkronog stroja AZ100L:

Tip motora:	AZ100L, KONČAR
Snaga motora [kW]:	3
Nazivni napon [V]:	380
Nazivna struja [A]:	7
cos φ :	0.8
Nazivna brzina [r/min]:	1420
Frekvencija [Hz]:	50

Na stroju AZ100L je, pri konstantnom opterećenju, snimljena struja za različite frekvencije uzorkovanja. Snimanja su izvršena frekvencijama: 140 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 3kHz i 5kHz. Snimanjem na različitim frekvencijama ispitan je utjecaj frekvencije snimanja na rezultate. Naime, povećanje frekvencije snimanja omogućuje analizu sa većom maksimalnom frekvencijom spektra, ali povećava vrijeme provedbe transformacije. Spektri dobiveni snimanjem na frekvencijama 140 Hz, 1kHz i 5kHz, snimljeni pri približno istom opterećenju, prikazani su na slikama 6-15 a, b i c. Spektri ostalih snimaka nalaze se u prilogu A-1.



a) $f_u = 140$ Hz

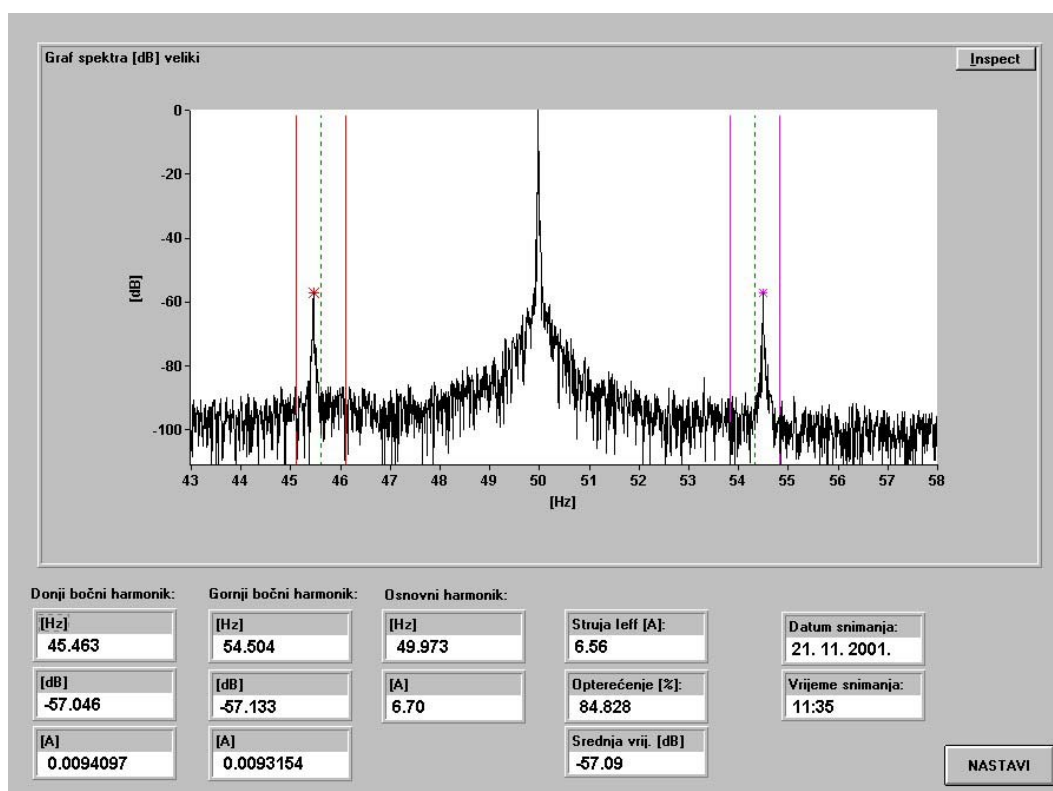
b) $f_u = 1000$ Hzc) $f_u = 5000$ Hz

Sl. 6-15 Spektri struje snimljeni različitim frekvencijama

Na slikama je vidljivo da se na frekvencijama snimanja većim od 1 kHz, iznos bočnih harmonika ne mijenja značajno (1-2 %). Na nižim je frekvencijama vidljiv utjecaj smetnji. U nekim slučajevima spektar je bio toliko loš da nije bilo moguće odrediti bočne harmonike. Iz

tih je razloga kao minimalna frekvencija snimanja odabrana frekvencija 1 kHz. Na frekvencijama višim od 1 kHz, Fourierova je transformacija trajala osjetno duže (pri 1 kHz FFT traje oko 2 min., dok je na 5 kHz trajala 20 min.) uz neprimjetnu promjenu na kvaliteti. Sva su ostala snimanja iz ovih razloga izvršena sa frekvencijom uzorkovanja 1kHz.

Nakon odabira frekvencije 1 kHz, kao osnovne frekvencije snimanja, asinkroni stroj AZ100L i AZ132S snimljeni su pri promjeni opterećenja od 60% do 130% nazivne struje. Na slici 6-16 prikazan je spektar struje za nazivno opterećenje. Slike pri ostalim opterećenjima prikazane su u prilogu A-2.



Sl. 6-16 Spektar AZ100L pri nazivnom opterećenju

6.3. Ispitivani stroj

Tablica 6-1 Nazivni podaci ispitivanog asinkronog stroja

Tip:	2 AZ 307 – 4, KONČAR
Br.:	904636
U_n	380 V, Δ
I_n	42 A
P_n	22 kW
$\cos \varphi$	0.88
n_n	1470 r/min
f_n	50 Hz
N_2	40

Za terećenje je korišten istosmjerni generator opterećen otpornikom:

Proizvođač	SIEMENS - SCHUOKERT
Br.:	4544775N
Tip:	AG267
n_n	1500 r/min
P_n	104 kW
U_n	285 V
I_n	365 A
Uzbuda:	220V, 10 A max

STANJE 1

U prvom je slučaju bio prerezan kratkospojni prsten, iz stroja su bila izvađena dva susjedna štapa i jedan je štap bio prerezan. Prikaz kvara u tom stanju vidljiv je na slikama 6-17 a) i b). Rastavljanjem stroja ustanovljeno je da su, u stanju 1, ležajevi stroja bili u vrlo lošem stanju. U ovom stanju nisu izvršena snimanja motora napajanog preko frekvencijskog pretvarača.



a)



b)

Sl. 6-17 Veliko oštećenje rotorskog kaveza (namjerno urađenog za ispitivanje)

STANJE 2

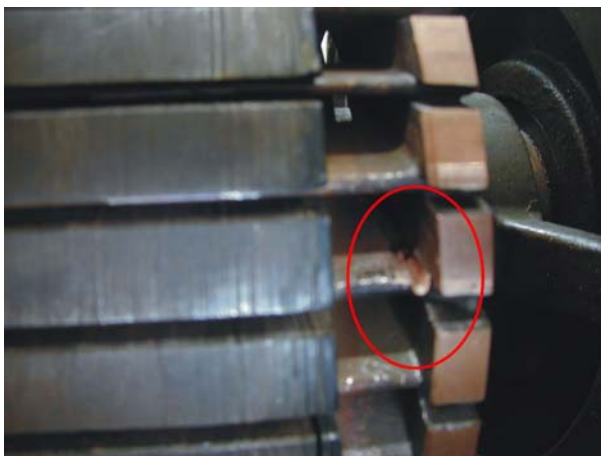
U stanju 2 rotor stroja je u potpunosti obnovljen. U tvornici je zamijenjen kavez rotora. Ležajevi stroja su zamijenjeni novim. Od stanja 2 ispitivanja su provedena i za napajanje iz frekvencijskog pretvarača. Detalj rotora s novim kavezom prikazan je na slici 6-18.



Sl. 6-18 Detalj novog kaveza

STANJE 3

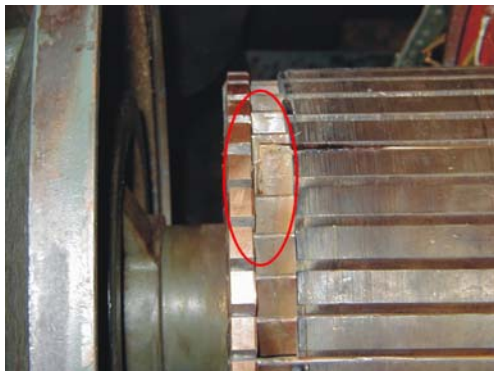
Da bi se ispitivanje provelo u uvjetima pretpostavljenih postepenih kvarova, nakon referentnog ispitivanja ispravnog rotora, jedan je štap za početna ispitivanja samo djelomično zarezan. Rezanja štapa su u svim fazama vršena na spoju štapova i prstena. Ta su mjesta i u stvarnim uvjetima, prema iskustvu, najosjetljivija. Detalj namjerno urađenog oštećenja u ovoj fazi prikazan je na slici 6-19.



Sl. 6-19 Početno oštećenje jednog štapa kaveza

STANJE 4

U slijedećoj je fazi oštećeni štap prerezan do kraja. Oštećenje je prikazano na slikama 6-20 a) i b). Na slici se može uočiti da je tijekom rada prerezani štap izletio iz utora i ostrugao statorski paket. Do oštećenja statora nije došlo.



a)



b)

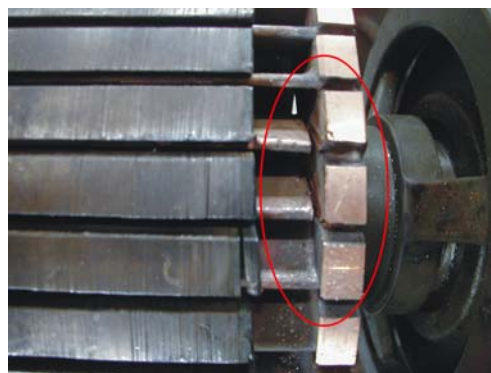
Sl. 6-20 Jedan štap kaveza potpuno prerezan

STANJE 5

U stanju 5 prerezana su dva štapa. Odabrani su susjedni štapovi, budući da su u slučaju pucanja jednog štapa, susjedni štapovi najviše dodatno opterećeni, jer preuzimaju i struju koja bi inače tekla kroz oštećeni štap. Izgled kvara prikazan je na slici 6-21. Povećanje struje štapovima izaziva povećana termička naprezanja.



a)



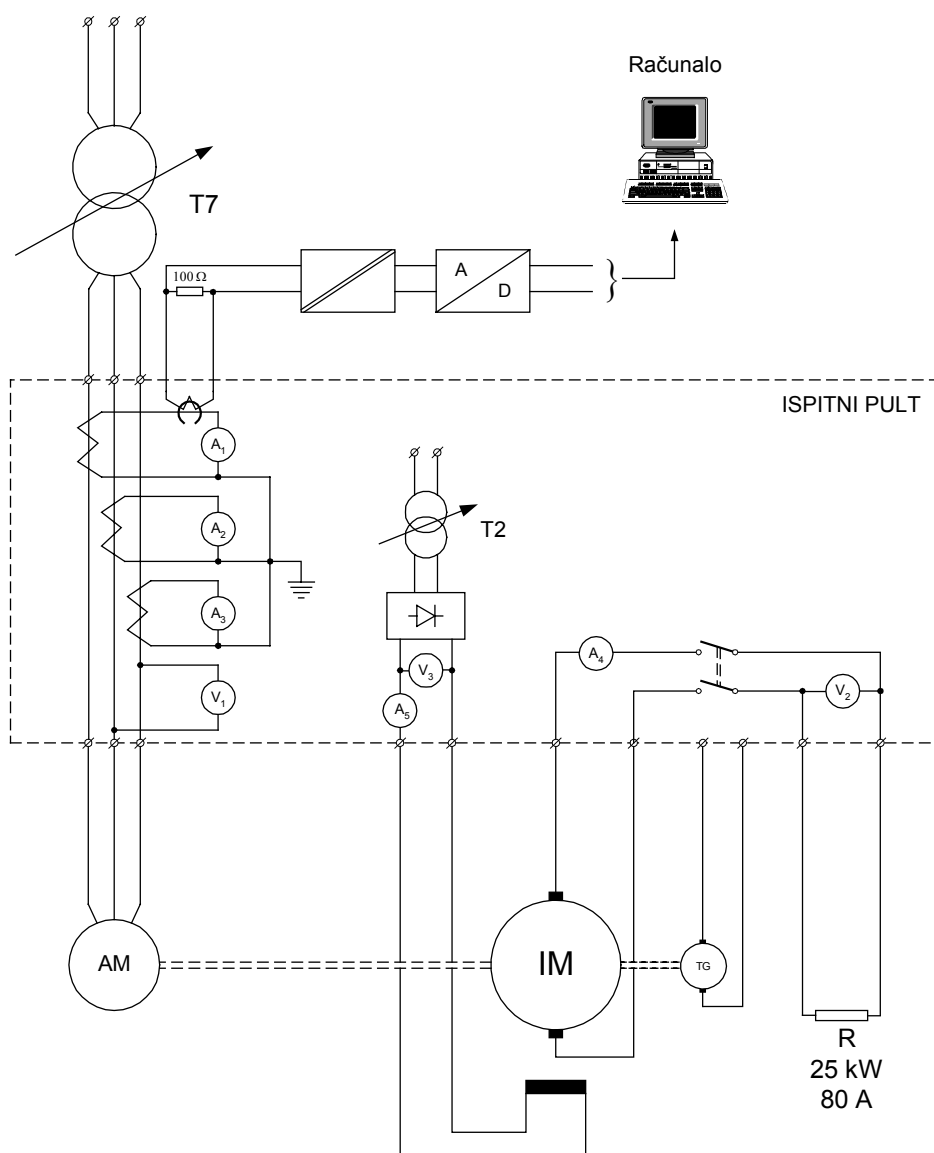
b)

Sl. 6-21 Dva štapa prerezana

6.4. Ispitivanje asinkronog stroja 22 kW za različite kvarove kaveza

Shema spoja iskorištenog za snimanje statorske struje prikazana je na slici 6-22. Signal strujnih kliješta zaključen je otporom $100\ \Omega$ i izolacijskim pojačalom prilagođen ulaznom rasponu A/D pretvarača.

Pri analizi treba uzeti u obzir da je niži bočni harmonik ($-2sf_l$) direktna posljedica nesimetrije rotorskog kaveza, dok je viši harmonik ($+2sf_l$) posljedica nastalih oscilacija brzine vrtnje. Iz tih je razloga viši bočni harmonik samo prikazan, dok su sve analize izvršene isključivo za niži harmonik.



Sl. 6-22 Laboratorijski postav za snimanje spektra statorske struje asinkronog motora

Ispitivanja stroja pri različitim opterećenjima su, radi usporedbe, izvršena i pomoću programskog paketa MotorMonitor. Ispitivanja, pri napajanju iz frekvenzijskog pretvarača, su izvršena isključivo korištenjem izrađene aplikacije.

6.4.1. Rad na krutoj mreži

Snimanjem pri različitim opterećenjima istraživalo se, kako na iznos bočnih harmonika, utječe veličina opterećenja. Nadalje se istraživalo kako se bočni harmonici mijenjaju pri postepenom povećanju kvara. Rezultati snimanja su prikazani tablično. U tablicama su navedene vrijednosti osnovnog i bočnih harmonika u amperima i dB, te frekvencije na kojima se pojavljuju. Radi boljeg praćenja razvoja kvara, tablice su navedene od ispravnog stanja prema lošijem, iako je stroj prvo snimljen za najlošije stanje. Numeracija pojedinih stanja određena je prema redoslijedu snimanja.

Tablica 6-2 Iznosi i frekvencije harmonika struje za ispravan stroj

Osnovni harmonik		Niži harmonik			Viši harmonik		
[Hz]	[A]	[Hz]	[A]	[dB]	[Hz]	[A]	[dB]
49.990	18.670	49.650	0.109	-44.674	50.350	0.099	-45.510
50.011	19.110	49.770	0.092	-46.349	50.260	0.090	-46.550
50.034	24.860	49.290	0.113	-46.848	50.780	0.064	-51.786
49.995	30.660	48.910	0.089	-50.744	51.090	0.050	-55.752
49.973	35.590	48.540	0.109	-50.278	51.410	0.050	-57.047
50.018	43.500	48.331	0.112	-51.785	51.720	0.040	-60.729
49.980	46.460	47.870	0.110	-52.514	52.100	0.043	-60.672
50.011	52.780	47.744	0.091	-55.269	52.280	0.036	-63.323

Tablica 6-3 Iznosi i frekvencije harmonika struje za stroj sa djelomičnim oštećenjem jednog štapa

Osnovni harmonik		Niži harmonik			Viši harmonik		
[Hz]	[A]	[Hz]	[A]	[dB]	[Hz]	[A]	[dB]
49.988	18.610	49.630	0.104	-45.054	50.350	0.940	-25.932
50.020	19.700	49.728	0.090	-46.804	50.315	0.083	-47.508
49.995	24.870	49.270	0.136	-45.243	50.730	0.069	-51.137
49.995	29.740	48.965	0.110	-48.639	51.040	0.047	-56.025
49.998	35.110	48.644	0.073	-53.642	51.345	0.399	-38.889
49.957	38.650	48.499	0.105	-51.319	51.420	0.033	-61.373
49.973	46.110	48.034	0.096	-53.658	51.932	0.035	-62.395
49.988	52.550	47.736	0.103	-54.155	52.245	0.027	-65.784

Tablica 6-4 Iznosi i frekvencije harmonika struje za stroj sa jednim prerezanim štapom

Osnovni harmonik		Niži harmonik			Viši harmonik		
[Hz]	[A]	[Hz]	[A]	[dB]	[Hz]	[A]	[dB]
50.011	16.390	49.667	0.106	-43.785	50.361	0.100	-44.292
50.003	22.300	49.201	0.130	-44.687	50.819	0.096	-47.321
50.018	24.640	49.316	0.072	-50.686	50.742	0.081	-49.663
49.950	27.240	48.965	0.144	-45.537	51.040	0.102	-48.532
50.011	38.200	48.660	0.328	-41.324	51.380	0.139	-48.781
49.980	43.530	48.280	0.442	-39.867	51.704	0.129	-50.564
49.970	51.140	47.973	0.561	-39.196	51.980	0.136	-51.504
49.980	54.700	47.675	0.710	-37.735	52.291	0.104	-54.419

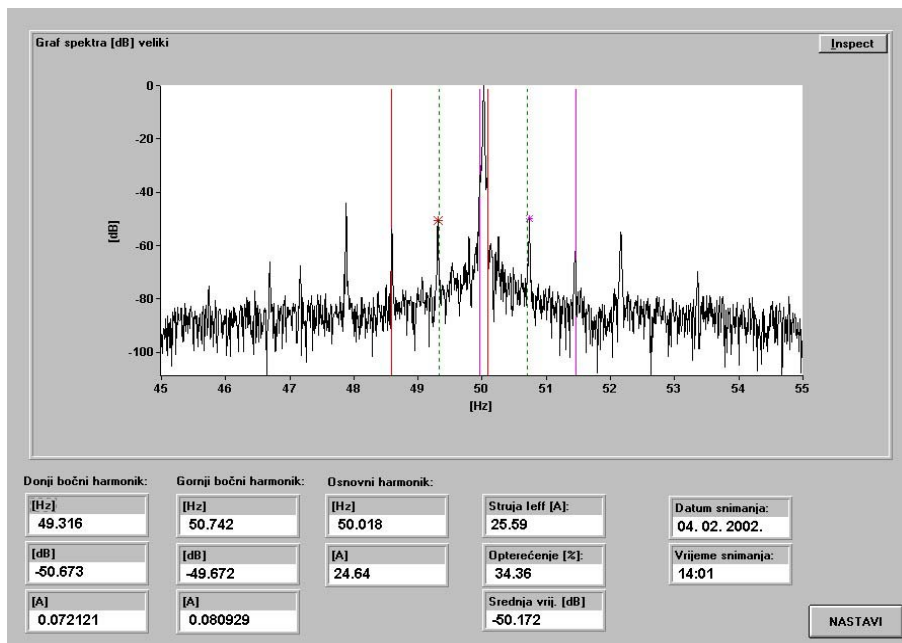
Tablica 6-5 Iznosi i frekvencije harmonika struje za stroj sa dva prerezana štapa

Osnovni harmonik		Niži harmonik			Viši harmonik		
[Hz]	[A]	[Hz]	[A]	[dB]	[Hz]	[A]	[dB]
50.011	17.500	49.640	0.088	-45.981	50.384	0.076	-47.256
50.003	17.420	49.705	0.052	-50.501	50.307	0.068	-48.171
49.988	23.100	49.278	0.234	-39.888	50.719	0.205	-41.037
50.003	28.120	48.904	0.530	-34.495	51.109	0.290	-39.732
50.003	35.820	48.583	0.749	-33.593	51.437	0.341	-40.427
49.980	36.450	48.270	0.979	-31.418	51.711	0.332	-40.811
49.980	41.780	47.981	1.160	-31.130	51.994	0.288	-43.232
49.973	50.060	47.698	1.450	-30.762	52.268	0.229	-46.793

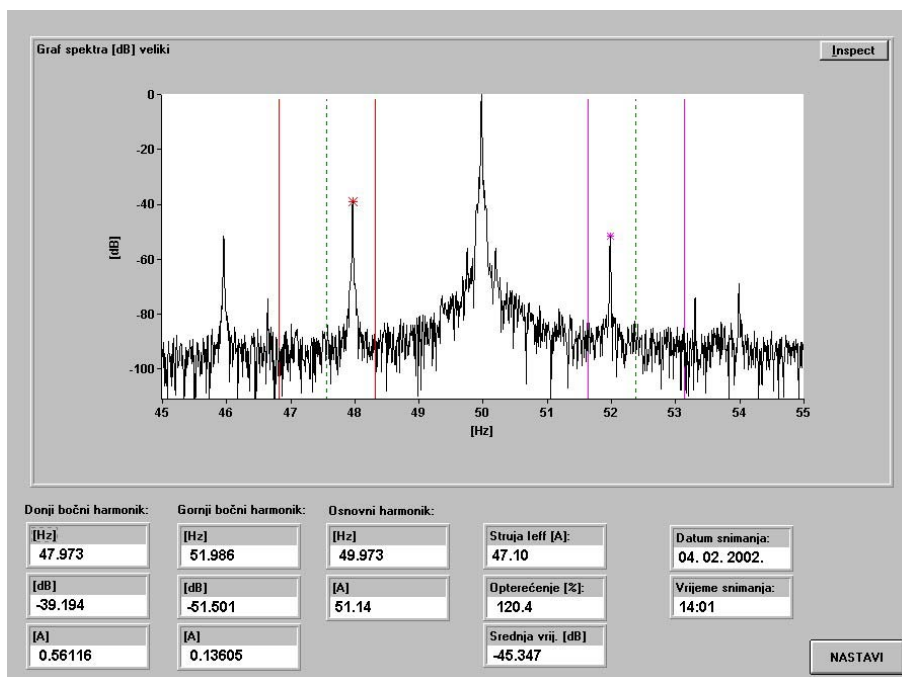
Tablica 6-6 Iznosi i frekvencije harmonika struje za stroj sa teško oštećenim kavezom

Osnovni harmonik		Niži harmonik			Viši harmonik		
[Hz]	[A]	[Hz]	[A]	[dB]	[Hz]	[A]	[dB]
49.990	17.820	49.610	0.091	-45.837	50.380	0.073	-47.752
49.990	18.920	49.640	0.260	-37.239	50.360	0.310	-35.711
49.980	23.860	49.170	0.880	-28.664	50.810	0.650	-31.295
49.970	28.870	48.840	1.540	-25.459	51.110	0.845	-30.672
50.003	33.160	48.590	2.288	-23.223	51.420	0.959	-30.776
49.995	38.440	48.260	2.360	-24.237	51.740	0.955	-32.096
49.980	43.130	47.958	3.110	-22.840	52.016	0.791	-34.732
49.988	48.510	47.600	2.990	-24.203	52.380	1.014	-33.596

Izgled spektra struje, kod dva različita opterećenja, za stroj sa jednim prerezanim štapom (stanje 4) prikazan je na slikama 6-23 a) i b). Vrijednosti se bočnih harmonika ispisane u prozorima na slici, razlikuju od vrijednosti u tablicama, zbog zaokruživanja brojeva prilikom prebacivanja u tablice.



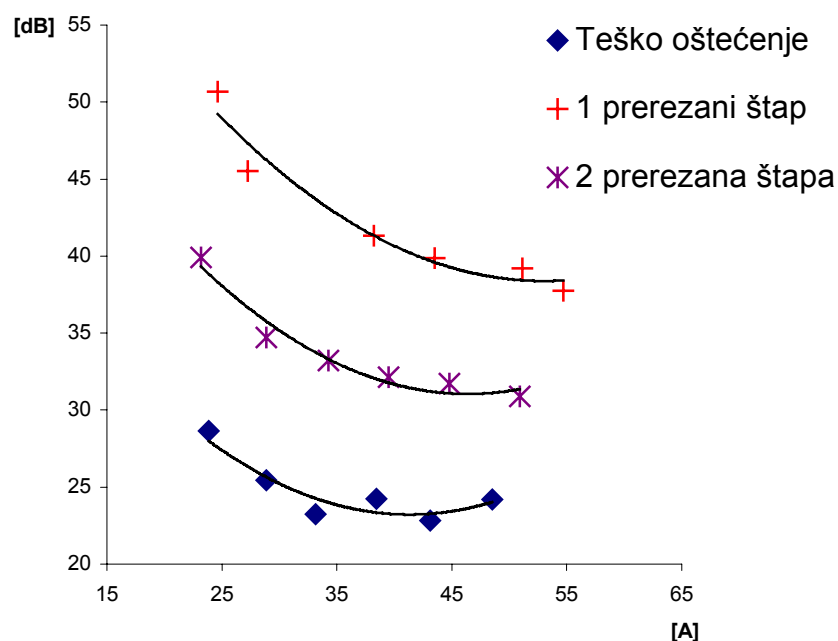
a) opterećenje 25 A



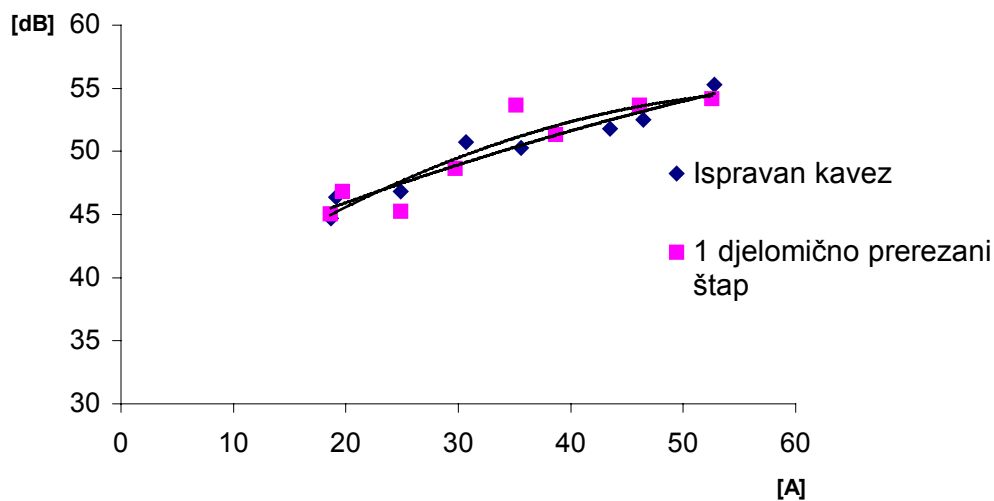
b) opterećenje 45 A

Sl. 6-23 Izgled spektra struje kod različitih opterećenja za stroj sa dva prerezana štapa pri radu na mreži

Izgled spektara za ostala stanja i sva opterećenja prikazan je u prilogu B.



Sl. 6-24 Ovisnost iznosa bočnih harmonika o opterećenju za oštećeni rotor



Sl. 6-25 Ovisnost iznosa bočnih harmonika o opterećenju za ispravan rotor i rotor sa početnim oštećenjem

Na slikama 6-24 i 6-25 prikazane su ovisnosti iznosa bočnih harmonika o opterećenju stroja, za različite kvarove rotorskog kaveza. Dijagrami su odvojeno prikazani za stanja sa jednim prerezanim štapom, sa dva prerezana štapa i sa teško oštećenim rotorskim kavezom, od rezultata sa ispravnim kavezom i početnim oštećenjem štapova. Naime istraživanja su

pokazala da u slučaju ispravnog kaveza, kao i u slučaju početnog oštećena povećanjem opterećenja razlika osnovnog i bočnih harmonika, u dB, se prema očekivanju povećava. U slučaju oštećenog kaveza, povećanje opterećenja uzrokuje smanjenje razlike u dB (iznos se bočnih harmonika u odnosu na osnovni povećava). U oba slučaja ovisnost je bočnih harmonika o promjeni opterećenja asproksimirana polinomom drugog reda. Ovu bi ovisnost trebalo uzimati u obzir prilikom snimanja stanja stroja pri opterećenju manjem od nazivnog, odnosno dobivene vrijednosti povećati.

Tablica 6-7 Stanje 2

Struja [A]	Broj puknutih štapova	
	Procjena	Stvarni
18.670	0.456401	0
19.110	0.377862	0
24.860	0.357143	0
30.660	0.229559	0
35.590	0.242047	0
43.500	0.203877	0
46.460	0.187633	0
52.780	0.136986	0

Tablica 6-8 Stanje 3

Struja [A]	Broj puknutih štapova	
	Procjena	Stvarni
18.610	0.437296	1/2
19.700	0.358923	1/2
24.870	0.42811	1/2
29.740	0.291584	1/2
35.110	0.164962	1/2
38.650	0.214999	1/2
46.110	0.164671	1/2
52.550	0.155583	1/2

Tablica 6-9 Stanje 4

Struja [A]	Broj puknutih štapova	
	Procjena	Stvarni
16.390	0.504342	1
22.300	0.455741	1
24.640	0.231065	1
27.240	0.41415	1
38.200	0.664102	1
43.530	0.780608	1
51.140	0.840701	1
54.700	0.987139	1

Tablica 6-10 Stanje 5

Struja [A]	Broj puknutih štapova	
	Procjena	Stvarni
17.400	0.396133	2
18.520	0.222127	2
23.180	0.776248	2
28.880	1.367742	2
34.250	1.608763	2
39.510	1.803528	2
44.800	1.877023	2
50.920	2.045134	2

Tablica 6-11 Stanje 1

Struja [A]	Broj puknutih štapova	
	Procjena	Stvarni
17.820	0.400352	4
18.920	1.042084	4
23.860	2.57122	4
28.870	3.516985	4
33.160	4.32596	4
38.440	3.943191	4
43.130	4.477236	4
48.510	3.955681	4

Ukoliko se u izraz 5-13, za procjenu broja puknutih štapova, uvrste dobivene vrijednost bočnih harmonika, dobivaju se vrijednosti prikazane u tablicama 6-7 do 6-11. Može se primijetiti da se procijenjena vrijednost broja puknutih štapova mijenja sa opterećenjem. Veće vrijednosti opterećenja daju veću procijenjenu vrijednost. To znači da se za pouzdanu dijagnostiku mora osigurati dovoljno veliko opterećenje. Iz tablica je vidljivo da izraz 5-13, daje nešto manju vrijednost od stvarnog broja puknutih štapova, posebice kod manjih opterećenja. Dobiveni se rezultati slažu sa [28].

6.4.2. Rad na frekvencijskom pretvaraču

6.4.2.1. Frekvencijski pretvarač

U radu je korišten frekvencijski pretvarač nazivnih podataka prema tablici 6-12.

Tablica 6-12 Nazivni podaci frekvencijskog pretvarača

Tip	ACS 601 0030-3, ABB
Snaga	30 kVA
Struja	47 A
Napon	0 – 400 V
Frekvencija	0 – 50 Hz
$f_{\max}$	200 Hz

Energetski krug pretvarača čine diodni ispravljač, kondenzatori u istosmjernom međukrugu i IGBT most na motorskom priključku. Ovaj se tip pretvarača naziva pretvarač s naponskim međukrugom konstantnog napona i širinsko impulsnom pretvorbom generiranja promjenjivog napona i frekvencije.

Pretvarač je radio u režimu direktne regulacije momenta, što predstavlja režim vektorske regulacije bez davača brzine vrtnje. U tom režimu rada mjere se struje motora, napon međukruga i promatraju sklopna međustanja. Frekvencija modulacije napona, u svrhu postizanja izlazne frekvencije i napona, nije stalna već se optimira broj uklopa poluvodičkih sklopki invertora. U ovom režimu održavanja zadane brzine, frekvencija se mijenja ovisno o opterećenju (klizanju). Više o direktnoj regulaciji momenta može se pronaći u [32].

6.4.2.2. Snimanje stroja napajanog iz frekvencijskog pretvarača

Kao referentna, odabrana je nazivna brzina vrtnje 1470 r/min. U radu je frekvencijski pretvarač održavao konstantnu brzinu vrtnje, neovisno o teretu, mijenjajući frekvenciju. Ovaj je režim odabran iz razloga, što je u modernim reguliranim pogonima najčešći. Tablični prikaz vrijednosti bočnih harmonika za različita stanja uz promjenu opterećenja dan je u tablicama 6-13 do 6-16. Stanje 1 stroja, nije snimljeno u radu preko pretvarača. Naime, u vrijeme snimanja frekvencijski pretvarač nije bio raspoloživ.

Tablica 6-13 Iznosi i frekvencije harmonika struje za ispravan stroj

Osnovni harmonik		Niži harmonik			Viši harmonik		
[Hz]	[A]	[Hz]	[A]	[dBg]	[Hz]	[A]	[dB]
49.065	18.670	48.750	0.103	-45.141	49.390	0.108	-44.754
49.164	17.960	48.858	0.116	-43.797	49.480	0.079	-47.134
49.355	26.200	48.667	0.125	-46.428	50.056	0.094	-48.903
49.480	30.760	48.522	0.148	-46.354	50.452	0.086	-51.070
49.660	34.010	48.385	0.171	-45.972	50.956	0.087	-51.842
49.774	36.960	48.240	0.183	-46.106	51.246	0.121	-49.699
49.934	46.340	48.095	0.189	-47.790	51.788	0.054	-58.671
49.065	18.670	48.750	0.103	-45.141	49.390	0.108	-44.754

Tablica 6-14 Iznosi i frekvencije harmonika struje za stroj sa djelomičnim oštećenjem jednog štapa

Osnovni harmonik		Niži harmonik			Viši harmonik		
[Hz]	[A]	[Hz]	[A]	[dB]	[Hz]	[A]	[dB]
49.088	18.830	48.621	0.112	-44.513	49.567	0.116	-44.208
49.156	19.940	48.858	1.109	-25.096	49.468	0.086	-47.305
49.332	25.560	48.667	0.089	-49.163	50.002	0.064	-52.028
49.461	30.710	48.530	0.120	-48.162	50.407	0.088	-50.856
49.614	32.210	48.370	0.094	-50.697	50.880	0.058	-54.891
49.760	42.230	48.393	0.240	-44.908	51.154	0.183	-47.263
49.911	47.230	48.034	0.087	-54.694	51.803	0.054	-58.836
49.088	18.830	48.621	0.112	-44.513	49.567	0.116	-44.208

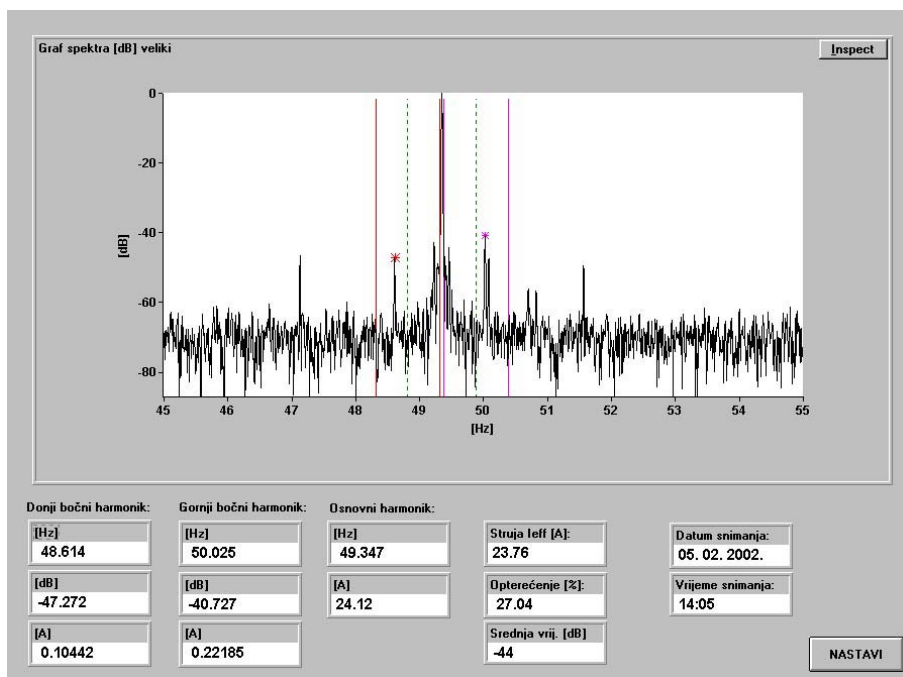
Tablica 6-15 Iznosi i frekvencije harmonika struje za stroj sa jednim prerezanim štapom

Osnovni harmonik		Niži harmonik			Viši harmonik		
[Hz]	[A]	[Hz]	[A]	[dB]	[Hz]	[A]	[dB]
49.072	18.140	48.690	0.117	-43.809	49.648	0.113	-44.111
49.156	19.720	48.850	0.101	-45.812	49.339	0.028	-56.862
49.347	24.120	48.614	0.104	-47.307	50.025	0.221	-40.760
49.461	30.000	48.461	0.199	-43.565	50.483	0.162	-45.352
49.606	35.010	48.286	0.312	-41.001	50.941	0.249	-42.960
49.759	39.630	48.110	0.379	-40.388	51.429	0.315	-41.994
49.858	44.210	48.019	0.435	-40.141	51.711	0.256	-44.746
49.072	18.140	48.690	0.117	-43.809	49.648	0.113	-44.111

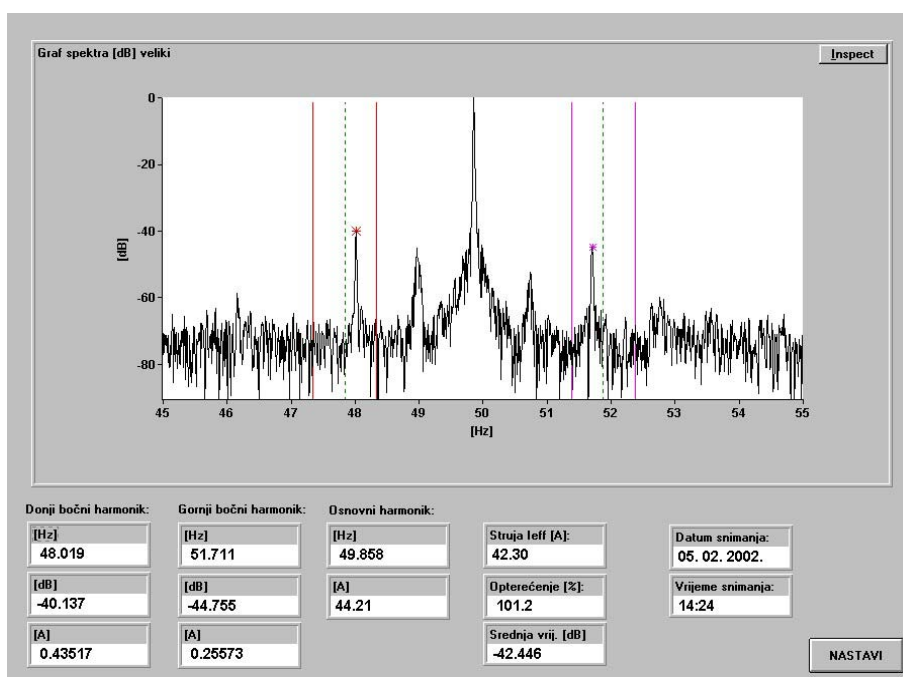
Tablica 6-16 Iznosi i frekvencije harmonika struje za stroj sa dva prerezana štapa

Osnovni harmonik		Niži harmonik			Viši harmonik		
[Hz]	[A]	[Hz]	[A]	[dB]	[Hz]	[A]	[dB]
49.065	18.410	48.721	0.099	-45.388	49.430	0.128	-43.157
49.150	19.690	48.858	0.570	-30.767	49.461	0.144	-42.718
49.301	24.800	48.675	0.236	-40.431	49.941	0.318	-37.840
49.461	30.010	48.469	0.500	-35.566	50.468	0.415	-37.184
49.591	33.530	48.339	0.720	-33.362	50.864	0.561	-35.529
49.713	41.380	48.171	0.848	-33.768	51.269	0.712	-35.286
49.828	46.390	47.981	0.995	-33.372	51.688	0.737	-35.979
49.065	18.410	48.721	0.099	-45.388	49.430	0.128	-43.157

Spektar struje, pri različitim opterećenjima, za stanje stroja sa dva prerezana štapa, prikazan je na slikama 6-26 a) i g). Spektri struja za ostala stanja nalaze se u prilogu C.



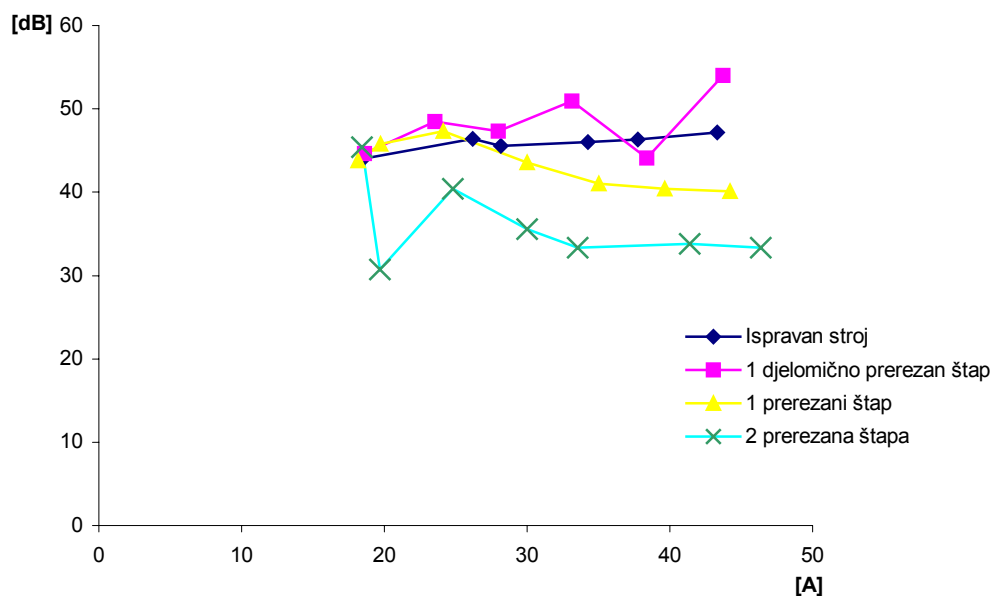
c) opterećenje 25 A



g) opterećenje 45 A

Sl. 6-26 Izgled spektra struje za različita opterećenja za *STANJE 4* pri radu na pretvaraču

Iz slika je vidljivo da se rad na pretvaraču odražava na spektru struje. Kao prvo vrijednosti bočnih harmonika, za pojedino stanje, su pri istom opterećenju manje (razlika u dB je veća), od vrijednosti pri radu na krutoj mreži.



Sl. 6-27 Dijagram ovisnosti iznosa bočnih harmonika o opterećenju za različita stanja rotora pri radu na frekvencijskom pretvaraču

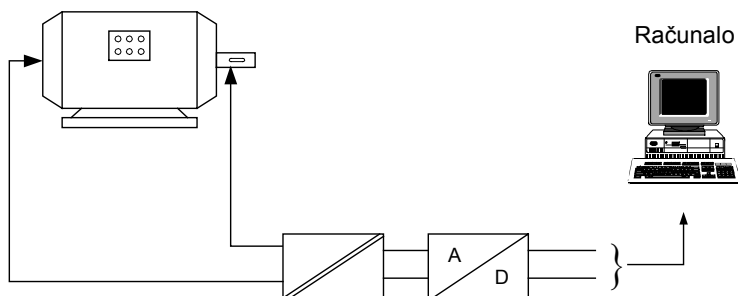
Ako se nacrtati dijagram ovisnosti bočnih harmonika o opterećenju stroja (slika 6-27), vidljivo je da je ovisnost bočnih harmonika nepravilna, pa krivulje nije moguće aproksimirati polinomom drugog reda, kao u slučaju rada na mreži. Pri malim opterećenjima vrijednost bočnih harmonika približno je ista za sva stanja rotorskog kaveza. Promjene vrijednosti bočnih harmonika (u dB), mijenjanjem opterećenja motora, manje su slučaju rada na frekvencijskom pretvaraču. Vrijednosti procjene broja puknutih štapova prema izrazu 5-13, u slučaju rada na pretvaraču daje manje vrijednosti nego u radu na mreži (pri istoj struji tereta)

Na slikama spektra moguće je uočiti pojavljivanje dodatnih harmonika, na frekvencijama bliskim frekvenciji mreže, kojih u slučaju rada na krutoj mreži nije bilo. Ovi su harmonici najvjerojatnije posljedica malih promjena frekvencije napajanja (frekvencija se mijenja kako bi se održala konstantna brzina vrtnje). Iz tih je razloga potreban povećan oprez prilikom odabira bočnih harmonika, koji su posljedica kvara rotora.

Zbog svega ovoga, dijagnostika je stanja prilikom rada na frekvencijskom pretvaraču otežana, i postoji mogućnost davanja procjene boljeg stanja stroja od stvarnog. Kako veliki dio modernih elektromotornih pogona radi sa asinkronim strojevima napajanim iz frekvencijskih pretvarača, ovo bi područje u budućnosti trebalo detaljnije istraživati.

6.5. Mjerenje napona osovine

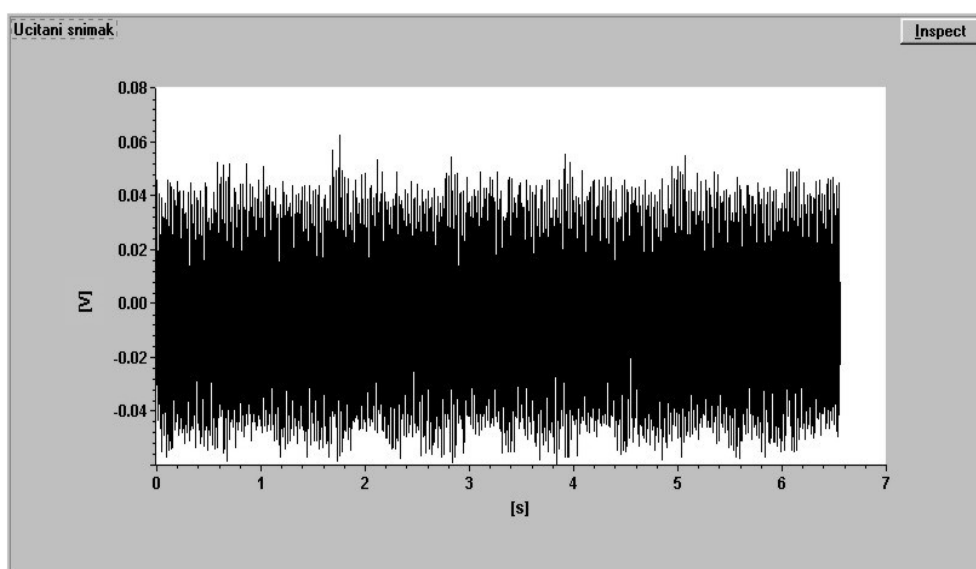
Za mjerenje napona osovine korištena je aplikacija razvijena u TestPoint-u. Aplikacija je poopćeni oblik aplikacije ta spektralnu analizu i neće biti posebno opisana. Principijelna shema mjerenje prikazana je na slici 6-28.



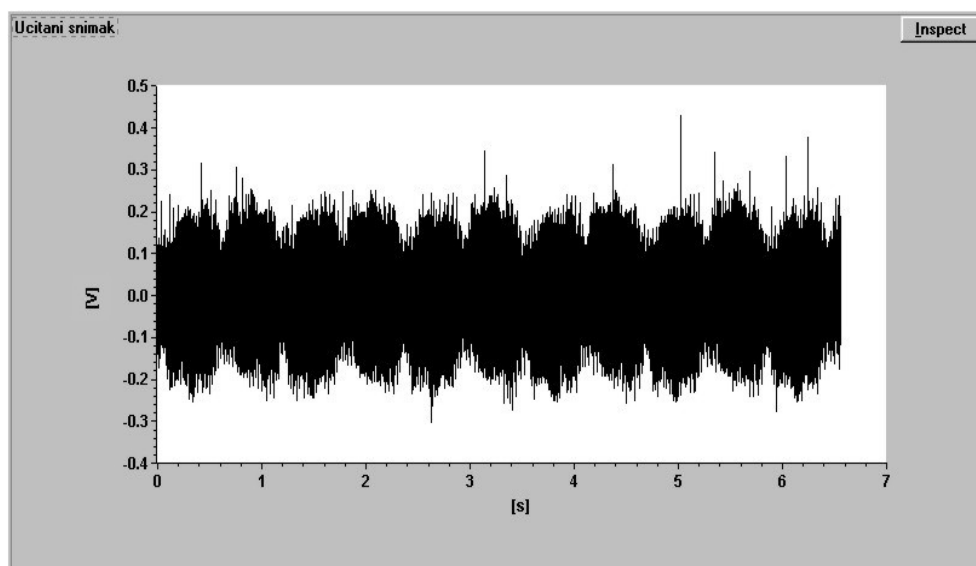
Sl. 6-28 Principijelna shema mjerenja napona osovine

Napon osovine snimljen je korištenjem dva klizna kontakta, po jedan na svakoj strani stroja. Na slobodnoj strani osovine kontakt je ostvaren pomoću golog vodiča obješenog preko osovine. Na drugoj strani korišten je kontakt koji se ručno, tijekom mjerenja prislanjao na osovinu. I u slučaju snimanja osovinskog napona, snimanje je izvršeno za različite stupnjeve kvara, pri različitim opterećenjima. Napon osovine snimljen je ta ispravan stroj, za stroj sa dva puknuta štapa i za stroj sa teškim oštećenjem kaveza, dok se opterećenje mijenjalo u granicama od praznog hoda do 120 % nazivnog.

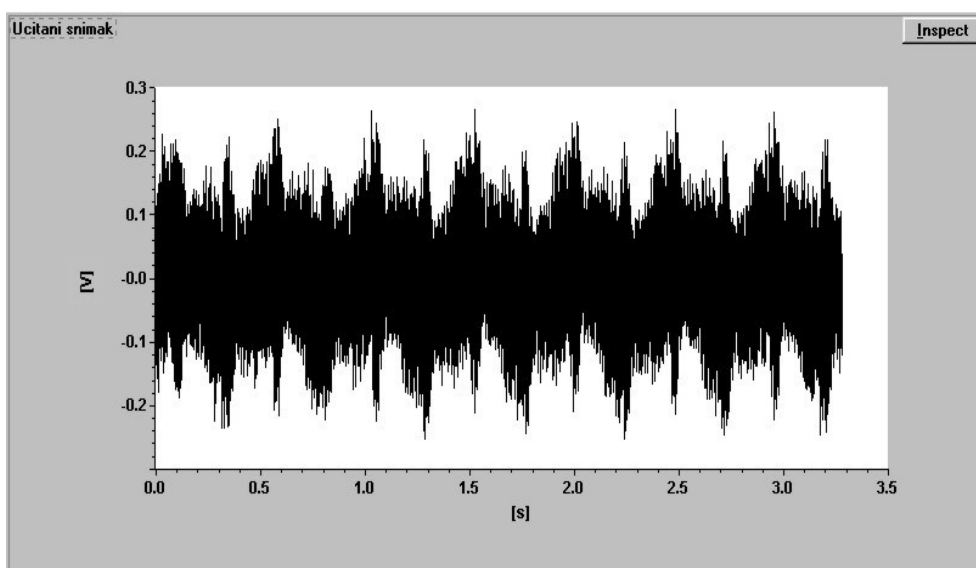
Rezultati mjerenja prikazani su na slikama 6-29, 6-30 i 6-31. Sve tri slike snimljene su pri približno nazivnom opterećenju stroja od 45 A.



Sl. 6-29 Napon osovine ispravnog stroja

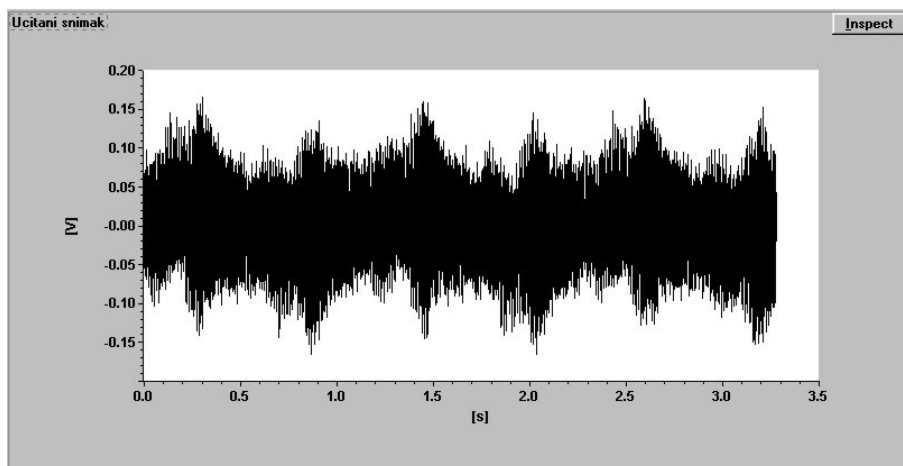


Sl. 6-30 Napon osovine stroja sa jednim prerezanim štapom

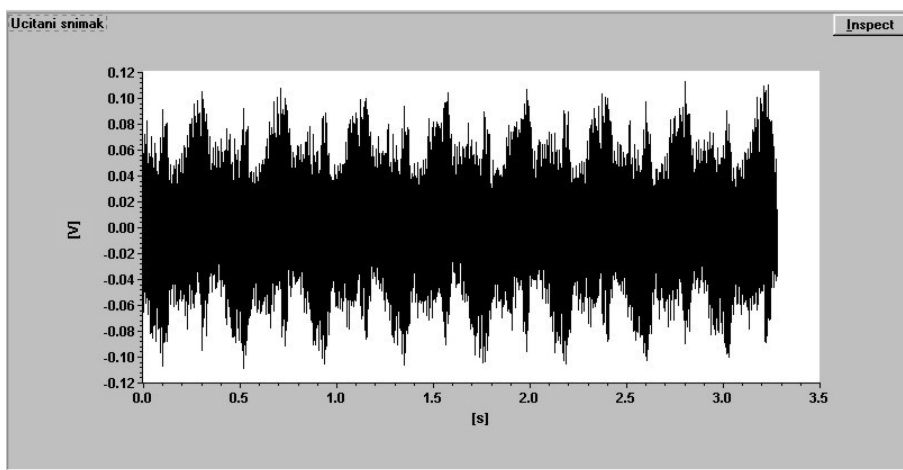


Sl. 6-31 Napon osovine stroja sa teškim oštećenjem rotorskog kaveza

Na slikama je moguće uočiti izobličenost napona osovine. Signal napona osovine moduliran je dodatnim signalom frekvencije $2sf_l$. Ovi se harmonici pojavljuju i u signalu brzine i momenta [27]. Promjena opterećenja ne utječe na značajno na iznos napona osovina. Sukladno, ovisnosti signala o klizanju moguće je uočiti promjene na frekvenciji dodatne komponente. Promjena izgleda napona osovine za različite vrijednosti opterećenja stroja vidljiva je na slikama 6-32 i 6-33.



Sl. 6-32 Napon osovine kod 25 A opterećenja za stroj sa teškim oštećenjem kaveza



Sl. 6-33 Napon osovine kod 50 A opterećenja za stroj sa teškim oštećenjem kaveza

Dijagnostika stanja mjerenjem napona osovine omogućuje detekciju kvara promatranjem i analizom snimljenog signala. Metoda je u stvarnim pogonima složena za provedbu. Naime, u mnogim je slučajevima pristup osovini izuzetno težak ili nemoguć. Dodatni problem predstavlja izvedba zadovoljavajućih kontakata, koji osiguravaju siguran signal i ne zahtijevaju zaustavljanje pogona. Čak i u laboratorijskim uvjetima snimanja je bilo potrebno ponavljati po nekoliko puta, da bi se dobio zadovoljavajući snimak. Iz ovih je razloga metoda upotrebljiva prvenstveno u laboratorijskim uvjetima. Daljnje proučavanje metode interesantno je u slučajevima strojeva u kojima su već ugrađene senzori za mjerenje osovinskih napona.

6.6. Analiza rasipnog polja stroja

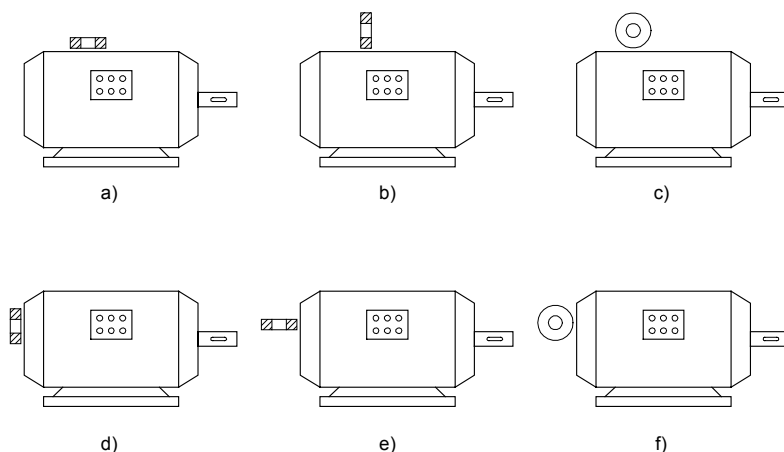
6.6.1. Korištenje ispitnog svitka na kućištu stroja

Analizom napona induciranog u zavojnici postavljenoj na kućištu stroja moguće je detektirati kvarove rotorskog kaveza. Analizu je moguće vršiti u vremenskoj i u frekvencijskoj domeni. Nesimetrija nastala oštećenjem rotorskog kaveza u ispitnom će svitku inducirati dodatne harmonike na frekvencijama određenim izrazom [27]

$$f_{svit} = \frac{f_1}{p} \cdot (1-s) \pm s \cdot f_1 \quad (6-4)$$

Izraz 6-4 daje vrijednosti harmonika koji su smješteni oko frekvencije rotacije, razmaknuti za $2sf_1$.

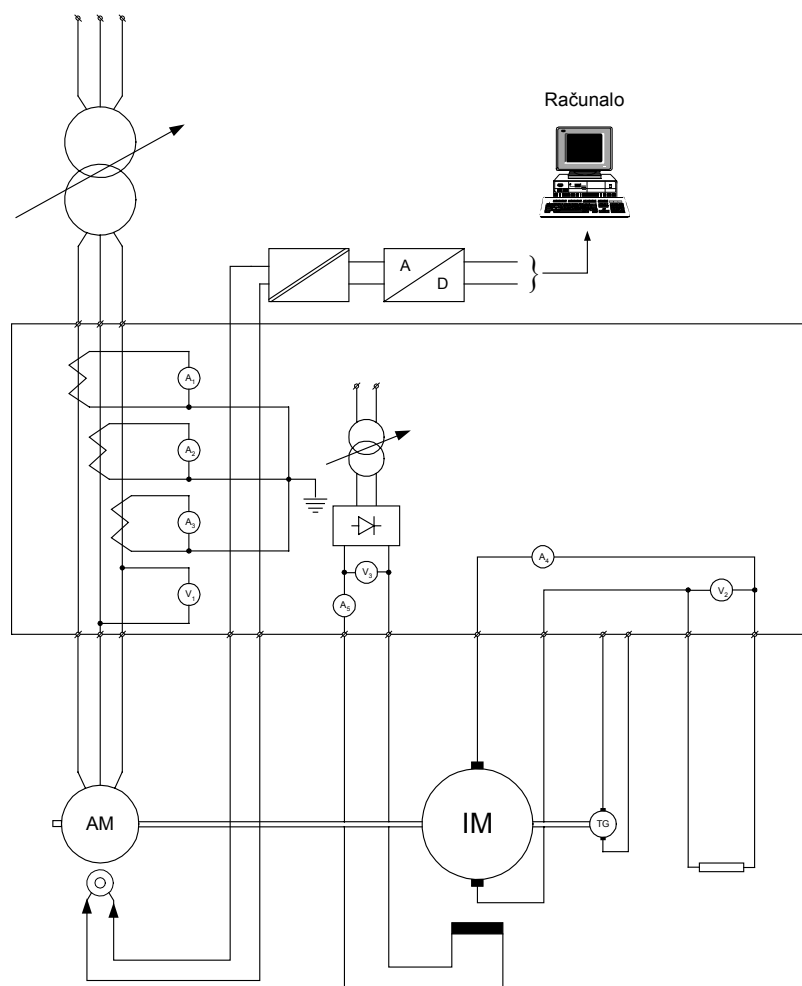
U radu je snimanje rasipnog toka izvršeno smještanjem svitka na hrptu (na sredini paketa) i na ležajnom štitu stroja. Na oba mjesta snimanje je izvršeno za tri različita položaja svitka. Smještaj svitka za različite položaje prikazan je na slici 6-34.



Sl. 6-34 Različiti položaji mjernog svitka

Snimanja su pokazala kako je za analizu i detekciju kvarova kaveza, najpogodnije postaviti svitak na hrptu stroja u položaju a), pa su priložene snimke za taj položaj.

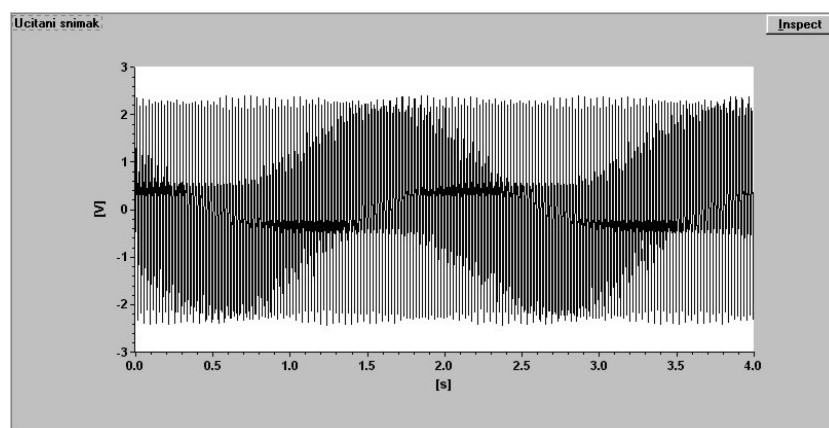
Za snimanje je upotrijebljena aplikacija pomoću koje je izvršeno i snimanje napona osovine. Shema mjerenja rasipnog toka dana je na slici 6-35.



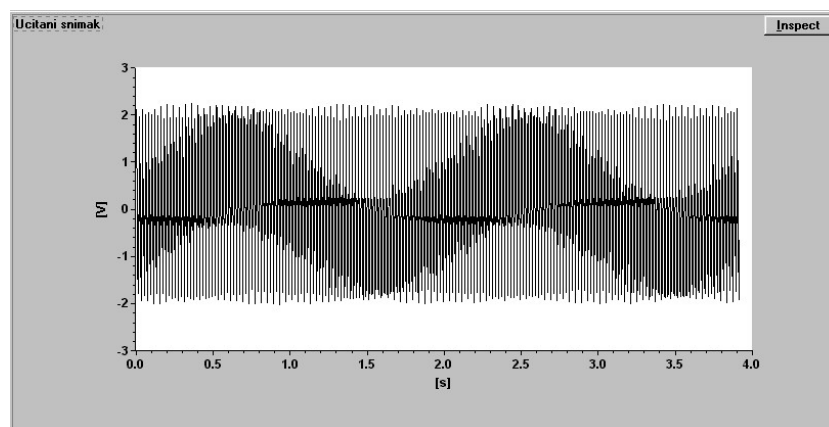
Sl. 6-35 Shema mjerenja rasipnog toka korištenjem ispitnog svitka

6.6.2. Rezultati mjerenja rasipnog toka

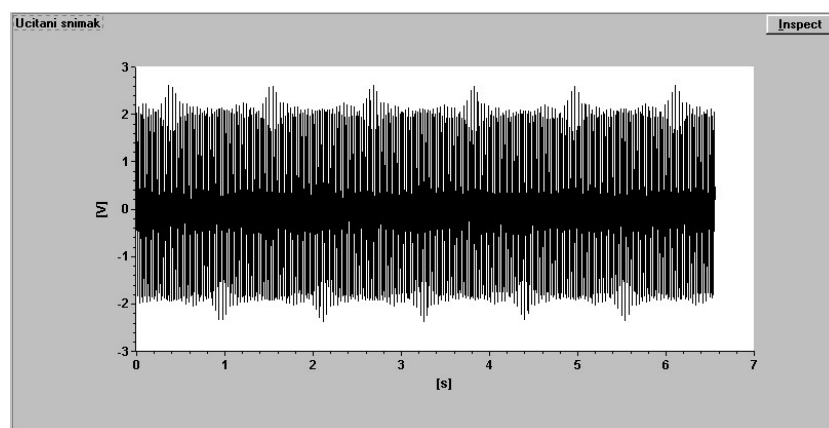
Izgled napona induciranog na položaju a), za različita stanja rotorskog kaveza prikazan je na slikama 6-36 do 6-40.



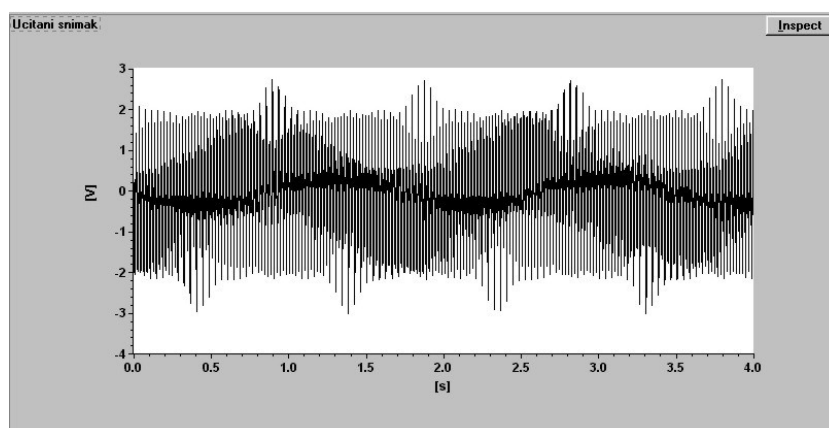
Sl. 6-36 Izgled napona induciranog u ispitnom svitku za stroj sa ispravnim rotorom



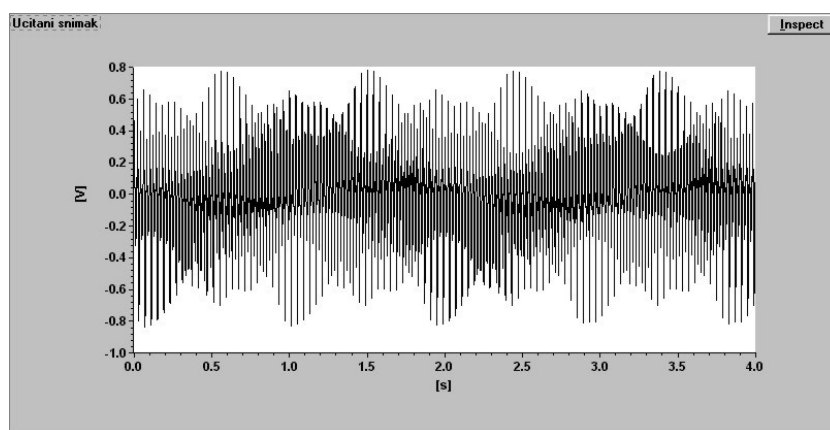
Sl. 6-37 Izgled napona induciranog u ispitnom svitku za stroj sa početnim oštećenjem štapa



Sl. 6-38 Izgled napona induciranog u ispitnom svitku za stroj sa jednim prerezanim štapom

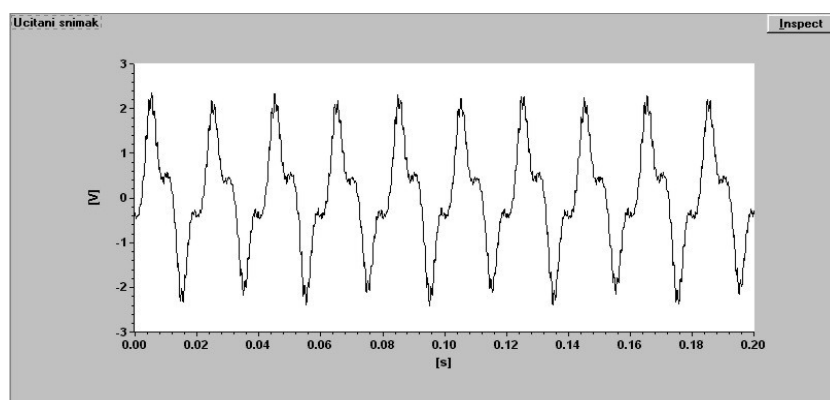


Sl. 6-39 Izgled napona induciranog u ispitnom svitku za stroj sa dva prerezana štapa

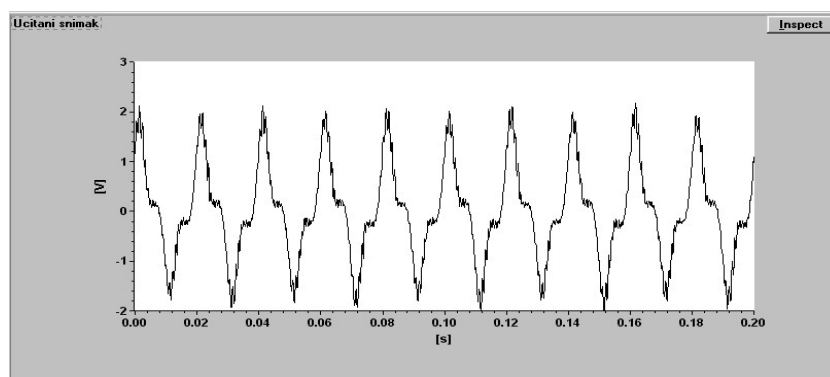


Sl. 6-40 Izgled napona induciranog u ispitnom svitku za stroj sa teškim oštećenjem rotora

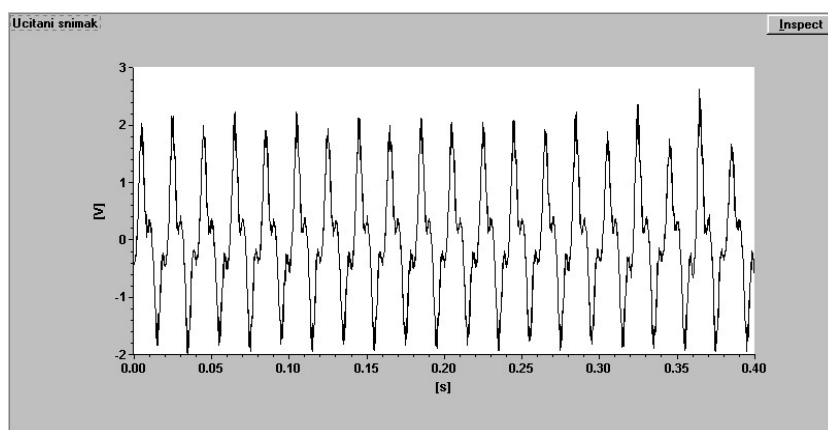
Na slikama je vidljivo kako se pojavom kvara valni oblik induciranog napona mijenja. Promjene su više izražene kod većih oštećenja, dok je kod početnog oštećenja jednog štapa, promjenu oblika napona teško uočiti. Promjene su još uočljivije kada se promatra uvećana slika nekoliko perioda. Izgled nekoliko perioda induciranog napona prikazan je na slikama 6-41 do 6-45.



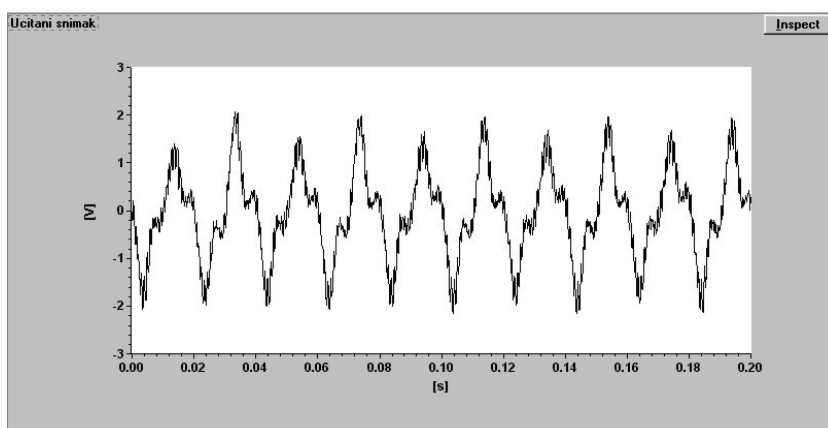
Sl. 6-41 Detalj napona svitka za ispravan stroj



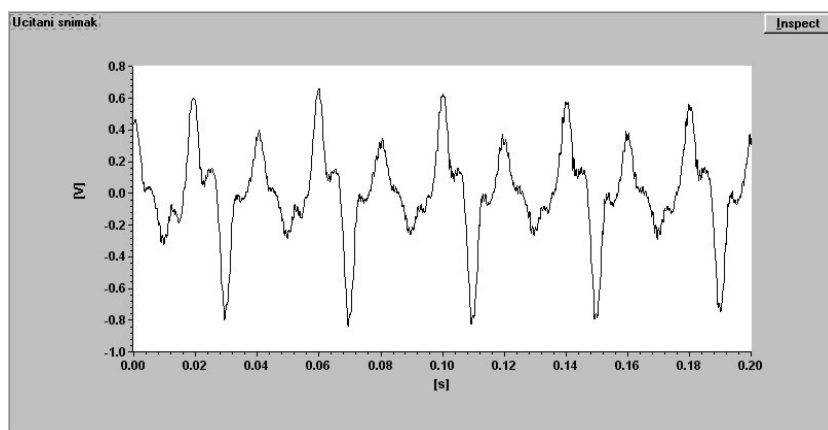
Sl. 6-42 Detalj napona svitka za stroj sa početnim oštećenjem jednog štapa



Sl. 6-43 Detalj napona svitka za stroj sa jednim prerezanim štapom

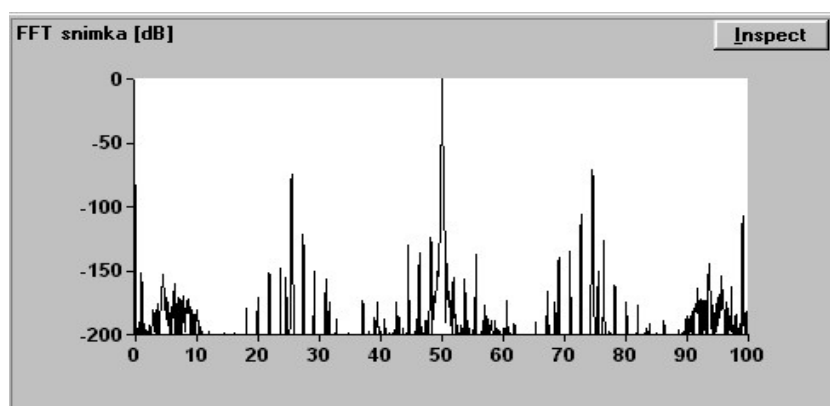


Sl. 6-44 Detalj napona svitka za stroj sa dva prerezana štapa

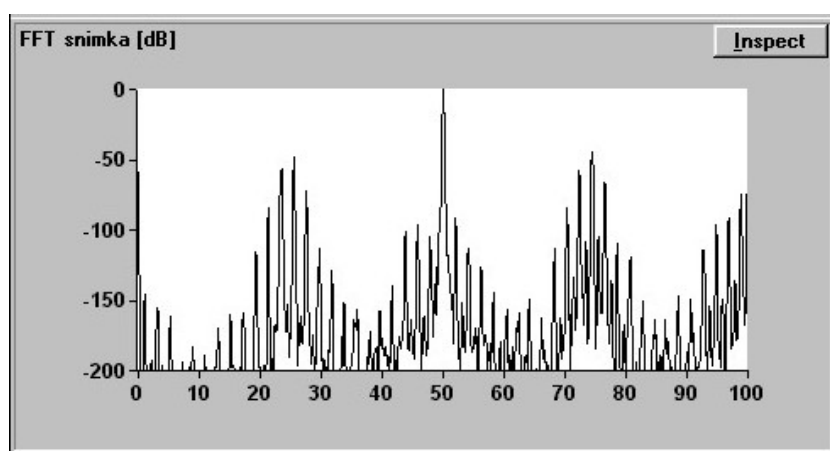


Sl. 6-45 Detalj napona svitka za stroj sa teškim oštećenjem rotorskog kaveza

Spektralnom analizom napona ispitnog svitka potvrđuje se postojanje dodatnih harmonika smještenih oko frekvencije brzine vrtnje određenih izrazom 6-4. Pri većim su oštećenjima dodatni harmonici više izraženi. Izgled spektra signala za stroj sa ispravnim rotorskim kavezom i za stroja sa dva prerezana štapa prikazan je na slikama



Sl. 6-46 Spektar napona ispitnog svitka za stroj sa ispravnim kavezom



Sl. 6-47 Spektar napona ispitnog svitka za stroj sa dva prerezana štapa

Spektri induciranog napona za stroj sa početnim oštećenjem štapa, sa jednim prerezanim štapom i za teško oštećenje rotorskog kaveza dani su u prilogu D.

Povedena snimanja pokazuju da je snimanjem i analizom rasipnog polja motora moguće detektirati kvarove rotorskog kaveza u ranoj fazi. Problemi se pojavljuju ukoliko se želi odrediti koliki je stupanj oštećenja. Naime, dok je kod analize statorsche struje bilo moguće odrediti približan broj puknutih štapova, u slučaju analize rasipnog toka takvo što nije moguće.

6.7. Programski paket Motormonitor

Programski paket Motormonitor proizvod je tvrtke Entek. Namijenjen je ranoj dijagnostici kvarova kaveza asinkronih strojeva, spektralnom analizom statorsche struje. Program ima mogućnost praćenja stanja stroja tijekom dužeg vremenskog perioda, uz mogućnost izgradnje baze ispitivanih strojeva. Nakon obavljanja analize stanja stroja, program daje izvješće o stanju stroja, numeričku ocjenu stanja kao i preporuku za daljnje održavanje.

Za provođenje Fourierove transformacije snimljenog signala struje, Motormonitor koristi spektralni analizator. Upravljanje i komunikacija programa i analizatora, riješena je korištenjem GPIB protokola.

Program daje ocjenu stanja u 7 različitih stupnjeva oštećena. U slučaju ispravnog stroja daje preporuku ponavljanja mjerenja za 12 mjeseci dok u najtežim slučajevima preporuča trenutno prekidanje rada motora.

Program Motormonitor upotrijebljen je za provjeru snimanja izrađenom aplikacijom, te za ispitivanje strojeva u stvarnim pogonima.

7. PRIMJERI IZ STVARNIH POGONA

U cilju provjere izrađene aplikacije i ispitivanju na što većem broju motora, program je isproban i u stvarnom pogonu izvan laboratorija, na 12 strojeva, širokog raspona snaga. Radi provjere rezultata, svi motori ispitani su paralelno i pomoću programskog paketa Motormonitor. Ispitani su asinkroni motori u normalnom radu na dvije lokacije Zagrebačkoj pivovari i Jadranskom naftovodu terminal Sisak. Ispitano je 6 različitih tipova strojeva prema tablici 7-1.

Tablica 7-1 Tipovi motora ispitanih na lokacijama Zagrebačka pivovara i JANAF Sisak

Tip motora	KONČAR, 4 AZSh 1127 –2	Tip:	KONČAR, 4 AZSh 905 -4
Snaga motora [kW]:	1900	Snaga motora [kW]:	500
Nazivni napon [V]:	6000	Nazivni napon [V]:	6000
Nazivna struja [A]:	209	Nazivna struja [A]:	58
cos φ :	0.91	cos φ :	0.88
Nazivna brzina [r/min]:	2980	Nazivna brzina [r/min]:	1485
Frekvencija [Hz]:	50	Frekvencija [Hz]:	50
Tip:	SCHORCH, KSN 319M-AVO14-Z	Tip:	AEG, KN7318L-AV018
Snaga motora [kW]:	355	Snaga motora [kW]:	355
Nazivni napon [V]:	380	Nazivni napon [V]:	400
Nazivna struja [A]:	630	Nazivna struja [A]:	600
cos φ :	0.91	cos φ :	0.9
Nazivna brzina [r/min]:	2955	Nazivna brzina [r/min]:	2960
Frekvencija [Hz]:	50	Frekvencija [Hz]:	50
Tip:	WEG, 315S/M	Tip:	Loher, AWLA280 MC- 42M
Snaga motora [kW]:	110	Snaga motora [kW]:	60
Nazivni napon [V]:	400	Nazivni napon [V]:	400
Nazivna struja [A]:	194	Nazivna struja [A]:	100
cos φ :	0.88	cos φ :	0.94
Nazivna brzina [r/min]:	1480	Nazivna brzina [r/min]:	2945
Frekvencija [Hz]:	50	Frekvencija [Hz]:	50

Iz tablice je vidljivo da je ispitan širok raspon snaga strojeva, i visokonaponskih (6 kV) i niskonaponskih (400 V). Spektri ispitanih strojeva prikazani su u prilogu F. Iznosi dobivenih harmonika odgovaraju vrijednostima koje su tipične za ispravne strojeve. Paralelno ispitivanje strojeva programom Motormonitor, potvrdilo je očekivanja i pokazalo kako se u ovom slučaju radilo o strojevima koji su u dobrom stanju, osim stroja 110 kW, 400 V, koji je bio u lošem stanju. Izvješće dobiveno programom Motormonitor nalazi se u prilogu G.

8. ZAKLJUČAK

U ovom je radu dan pregled tipičnih pogonskih kvarova kavezni asinkronih motora, te kratki opis primjenjivanih metoda dijagnostike stanja motora. Opisan je suvremeni pristup dijagnostičkom sustavu i prikazan kratak pregled mjerenja veličina bitnih za ocjenu stanja stroja. Dijagnostički je sustav raščlanjen na dijelove, i svaki je dio zasebno opisan. U razmatranju pojedinih dijelova, posvećena je pažnja primjeni računala u pojedinim fazama dijagnostičkog procesa.

Budući da su za potrebe održavanja pogona posebno značajni kvarovi rotorskih kaveza, u zasebnom su poglavlju opisane metode njihovog ranog otkrivanja i lociranja. U tu su svrhu obrađene metode dijagnostike kada je stroj izvan pogona "off-line", kao i metode kada je stroj u normalnom pogonu "on-line". Metode su obrađene od najjednostavnijih poput vizualnog pregleda motora i promatranja titranja kazaljki ampermetara, do složenih kompjuteriziranih metoda snimanja i spektralne analize statorske struje.

Kao jedna od najinteresantnijih metoda se pokazala upravo metoda spektralne analize statorske struje. Ta je metoda primjenjiva za asinkrone strojeve velikog raspona snaga i primjena. Osim toga ne zahtijeva ugradnju dodatnih mjernih članova, ni zaustavljanje pogona. Iz tih je razloga veliki dio rada posvećen toj metodi. Metoda se zasniva na činjenici da svaka pojava nesimetrije (oštećenje) rotorskog kaveza, u spektru statorske struje uzrokuje pojavu bočnih harmonika, udaljenih od frekvencije mreže za iznos $\pm 2sf_1$. Iz vrijednosti se bočnih harmonika može odrediti stanje kaveza motora.

U cilju što boljeg proučavanja metode, izrađena je aplikacija za snimanje i analizu struje. Aplikacija je izrađena u programu TestPoint. Program TestPoint suvremeni je programski paket namijenjen akviziciji i obradi podataka. Upravo iz razloga velike prilagodljivosti izrađenih aplikacija, snimanja i analize su izvršeni korištenjem tog paketa. Naime, iako postoje gotovi programi za dijagnostiku analizom spektra struje, izrada vlastite aplikacije omogućuje proširivanja i prilagodbe prema potrebama.

Mjerenja su izvršena korištenjem PC računala. Za mjerne je potrebe u računalu ugrađena kartica A/D pretvarača, DAS50. Ova je kartica odabrana zbog visoke frekvencije uzorkovanja od 1MHz i četiri kanala što je dovoljno za ovu primjenu.

Kao ispitni stroj za istraživanja odabran je četveropolni kavezni asinkroni motor snage 22 kW. Stroj je prvo ispitan sa velikim oštećenjem kaveza rotora (dva štapa izvađena, jedan štap prerezan...). Nakon te faze izvršena je zamjena rotorskog kaveza novim i zamijenjeni su ležajevi motora. Nadalje je stroj ispitan u ispravnom stanju i sa nekoliko različitih namjerno

izazvanih kvarova (djelomično oštećeni štap, jedan prerezani štap i dva prerezana štapa). Sva su ispitivanja provedena pri različitim opterećenjima, stroja od praznog hoda do 120% nazivnog opterećenja, kako bi se ispitala ovisnost bočnih harmonika o teretu i stupnju oštećenja.

U modernim se elektromotornim pogonima asinkroni strojevi sve češće napajaju iz frekvencijskih pretvarača. Iz tog je razloga motor ispitan i na krutoj mreži i na frekvencijskom pretvaraču, kako bi se provjerila primjenjivost navedene dijagnostičke metode i za slučaj motora napajanih iz pretvarača.

Iz snimanja se može zaključiti kako se vrijednosti bočnih harmonika bitno mijenjaju opterećenjem stroja. Iz tih je razloga važno snimanja provoditi pri što većem opterećenju stroja. Promjene vrijednosti harmonika prikazane su u radu tablično i grafički. Napajanje iz frekvencijskog pretvarača umanjuje vrijednosti bočnih harmonika u odnosu na vrijednosti pri radu na krutoj mreži za isto opterećenje. Takve vrijednosti mogu navesti na zaključak o boljem stanju stroja od stvarnog. Osim toga promjene harmonika, mijenjanjem opterećenja su manje izražene. Analiza spektra statorske struje daje manje pouzdane rezultate kada se ispituju asinkroni motori napajani iz pretvarača frekvencije. To je bilo i normalno za očekivati jer primjena pretvarača unosi nove harmoničke članove u spektar statorske struje, što nije jednostavno interpretirati.

Kao alternativne metode ispitivanja provedena su snimanja rasipnog toka korištenjem ispitnog svitka na kućištu stroja i snimanje osovinskog napona. Mjerenja su pokazala kako se iz podataka dobivenih snimanjem ove dvije veličine može indicirati pojavu kvara ali je teško odrediti stupanj oštećenja. Rezultati nekih eksperimenata su prikazani u radu.

Ovaj tip ispitivanja upućuje na potrebe daljnjeg razvoja dijagnostičkih metoda. Automatizacija dijagnostike kvara iz snimljenog spektra otvara mjesta i za primjenu metoda umjetne inteligencije, što bi moglo biti zanimljivo za daljnja istraživanja.

9. LITERATURA

- [1] Tavner P. J., Penman J., *"Condition Monitoring of Electrical Machines"*, John Wiley & Sons Inc., New York 1987.
- [2] Vas P., *"Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines"*, Clarendon press, Oxford 1993.
- [3] Fišer R., *"Modeliranje in diagnostika napak v pogonih z asinhronskimi motorji"*, Doktorska disertacija, Ljubljana 1998.
- [4] Jurković B., *"Elektromotorni pogoni"*, Školska knjiga Zagreb, 1983.
- [5] Nađ J., *"Ispitivanje sustava izolacije statora sinkronih generatora"*, FER 1995.
- [6] Ban D. i suradnici, *"Tehničke preporuke za redovito održavanje elektrostrojarske opreme u termoelektranama HEP-a, Knjiga 1: OPĆI DIO"*, FER-ZESA1999.
- [7] Ban D. i suradnici, *"Tehničke preporuke za redovito održavanje elektrostrojarske opreme u termoelektranama HEP-a, Knjiga 4: ELEKTROMOTORNA POSTROJENJA VLASTITE POTROŠNJE"*, FER-ZESA1999.
- [8] Bego V., *"Mjerenja u elektrotehnici"*, Tehnička knjiga – Zagreb 1979.
- [9] Avčin F., Jereb P., *"Ispitivanje električnih strojeva"*, Tehnička založba Slovenije, Ljubljana 1968
- [10] Jackson L. B., *"Digital Filters and Signal Processing"*, Kluwer Academic Publishers, Boston 1986
- [11] Ban D., Wolf R., Cettolo M., *"Kompjutorizirana "ON-LINE" dijagnostika stanja rotora asinkronih motora"*, 4. međunarodni simpozij o novim tehnologijama, Pula, 25.-27. 10. 1993., Hrvatska, pp. 80-83
- [12] Štefanko S., Paljan D. Krušelj D., Kurtović I., Momić M., *"Detekcija prekida kaveza rotora asinkronog motora"*, Elektrotehnika ELTB2 43(2000) 3-4, pp. 31-38
- [13] Thomson W T., Fenger M., *"Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults"*, IEEE Industry Applications Mag., Vol. 7, No. 4 July/August 2001, pp. 26-34

-
- [14] Bonnett A. H., Soukup G. C., "*Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors*", IEEE Trans. on Indust. Applic., vol. 28, No 4, July/August 1992
- [15] Moubray J., "*Reliability-centered Maintenance*", Second edition, Butterworth-Heinemann, Oxford 1997.
- [16] Cruz S. M. A., Marques Carsodo A. J., "*Rotor Cage Fault Diagnosis in Three-Phase Induction Motors, by Extended Park's Vector Approach*", ICEM 1998., Vol.3, pp.1844. - 1848
- [17] Cruz S.M.A., Marques Carsodo A.J., "*Further Developments on the Use of the Synchronous Reference Frame Current Park's Vector Approach*", IEEE SDEMPED 1. – 3. September 2001., Grado, Italy, p.p. 467. – 473.
- [18] Benbouzid M.E.H., Nejari H., Viera M., "*Induction Motor Faults Detection Using Advanced Spectral Analysis Technique*", ICEM 1998.,2. – 4. September, Istanbul, Turkey, p.p. 1849. – 1854.
- [19] Haji M. Toliyat H.A., "*Pattern Recognition – A Technique for Induction Machines Rotor Broken Bar Detection*", IEEE Trans. on Energy Conv., Vol. 6, No. 4, December 2001., p.p. 312. – 317.
- [20] Parlos A.G., Kim K., Bharadwaj R. M., "*Sensorless Detection of Induction Motor Faults*", IEEE SDEMPED '01, 1. – 3. September 2001., Grado, Italy, p.p. 663. – 70.
- [21] Cruz S.M.A., Marques Carsodo A.J., "*Rotor Cage Fault Diagnosis in Operating Three-Phase Induction Motors, Under the Presence of Time-Varying Loads*", EPE 2001, Graz.
- [22] Lazarević Z., Petrović D., "*The Advanced Method of Rotor Failure Detection in Large Induction Motors*", CIGRE 2000, 11-203
- [23] Nandi S., Toliyat H. A., "*Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Machines – A Review*", IEEE Industry Applications Conference 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting, Vol. 1, 1999., pp. 197-204.

- [24] Thomson W. T., "*A Review of On-Line Condition Monitoring Techniques for Three-Phase Squirrel-Cage Motors – Past Present and Future*", IEEE SDEMPED '99, Spain, Sept. 1999., pp. 3-18.
- [25] "*TestPoint – Techniques & Reference*", Users Guide, Capitel Equipment Corporation
- [26] Čorak T., "*Sustav automatiziranog ispitivanja asinkronog stroja u tvornici*", Magistarski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2001.
- [27] Elkasabgy N. M., Estham A. R., Dawson G. E., "*Detection of Broken Bars in the Cage Rotor on an Induction Machine*", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 1, Jan/Feb 1992.
- [28] Thomson W. T., Rankin D., "*Case Histories of On-Line Rotor Cage Fault Diagnosis*", 2nd International Conference Proc. Condition Monitoring, University College Swansea, 1987, pp. 798-819.
- [29] Stegić M., "*Postupci vibracijske dijagnostike stanja strojeva*", Održavanje i eksploatacija, Br6/7-96, pp. 38-43.
- [30] Penman J., Sedding H. G, Lloyd B. A., Fink W. T., "*Detection and Location of Interturn Short Circuits in the Stator Windings of Operating Motors*", IEEE Transactions Energy Conversion, Vol. 10, No. 4, Dec. 1994.
- [31] Klinman G. B., Koegl R. A., "*Noninvasive Detection of Broken Rotor Bars in Operating Induction Motors*", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 3, No. 4, December 1988, pp. 873-879.
- [32] Nash N. J., "*Direct Torque Control, Induction Motor Vector Control Without an Encoder*" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 2, March/April 1997.
- [33] Ban D. Wolf R., Cettolo M., "*Metode detekcije kvara kaveza asinkronog motora*", Elektrotehnika, 34 (1991), 6, pp.241-250

10. POPIS KORIŠTENIH OZNAKA

ϑ	- temperatura u °C
$\Delta\vartheta$	- porast temperature
ϑ_{okol}	- temperatura okoline
ω	- mehanička kutna brzina
ω_I	- sinkrona kutna brzina
θ	- prostorni kut na obodu
A	- omjer vrijednosti bočnog i osnovnog harmonika u dB
A_S	- omjer vrijednosti bočnog i osnovnog harmonika
B	- indukcija u rasporu
f_1	- frekvencija napona napajanja
f_2	- frekvencija rotorskih struja
f_{eksc}	- frekvencija dodatnih harmonika nastalih zbog ekscentriciteta
$f_{lež}$	- frekvencija dodatnih harmonika nastalih zbog kvara ležaja
f_u	- frekvencija uzorkovanja (otipkavanja) signala
f_{st}	- frekvencija dodatnih harmonika nastalih zbog kvara statorskog namota
f_v	- karakteristična frekvencija vibracije zbog kvara ležajeva
f_{bh}	- frekvencija bočnih harmonika
I_0	- struja praznog hoda
I_1	- efektivna vrijednost snimljene struje - efektivna vrijednost struje statora
I_2	- efektivna vrijednost struje rotora
I_n	- nazivna struja
k	- broj harmoničkog člana
K	- toplinski koeficijent
n_s	- sinkrona brzina vrtnje [r/min]
n_{vh}	- broj vremenskog harmonika (1, 3, 5, 7,...)
n_d	- stupanj ekscentriciteta; 0 za statički, 1 za dinamički
n_n	- nazivna brzina vrtnje [r/min]
n_p	- broj puknutih štapova
N_R	- broj rotorskih utora
N	- broj prolaza markice pri mjerenju klizanja - broj snimljenih točaka

N_2	– broj štapova rotora, broj faza rotora
p	– broj pari polova
R	– broj rotorskih utora
R_h	- hladni otpor otpornog termometra
R_t	- topli otpor otpornog termometra
s	- klizanje
s_l	- vrijednost klizanja pri snimanom opterećenju
s_n	- vrijednost klizanja pri nazivnom opterećenju
T	- vrijeme prolaza markice (određivanje klizanja)
	- perioda

11. SAŽETAK

U ovom je magistarskom radu dan kratki opis tipičnih pogonskih kvarova asinkronih kaveznih motora većih snaga, te kratki pregled najčešće primjenjivanih metoda tehničke dijagnostike za otkrivanje navedenih kvarova. Korištenjem jednog komercijalno dostupnog programskog paketa laboratorijski su razvijene aplikacije za dijagnostiku stanja kaveznog rotora spektralnom analizom statorske struje, signala osovinskog napona te signala napona induciranog aksijalnim rasipnim tokovima izvan kućišta statora. Provjera izrađene aplikacije je napravljena tako da su namjerno izazvani različiti kvarovi, a potom uspoređivani rezultati dijagnostike stanja ispravnog i namjerno oštećenog motora. Razvijene su aplikacije primijenjene na dijagnostiku kvarova asinkronog kaveznog motora u laboratorijskim uvjetima (motor 22 kW) i u stvarnim uvjetima industrijskog elektromotornog pogona (motori 1900 kW, 500 kW, 355 kW, ukupno 12 strojeva). Pokazalo se još jednom da je najpouzdanija dijagnostička "on-line" metoda ona koja se bazira na spektralnoj analizi statorske struje motora. Analize signala osovinskog napona i rasipnih tokova izvan motora mogu biti korisne i za otkrivanje drugih kvarova u motoru, naročito onih koje se odnose na stator. Primjenom razvijene aplikacije za dijagnostiku stanja asinkronih motora napajanih preko pretvarača frekvencije i napona se otkrilo da je dijagnostika kvara otežana i manje pouzdana zbog toga što se u spektru statorske struje i svim drugim signalima pojavljuju dodatni parazitni harmonički članovi uzrokovani primjenom pretvarača frekvencije.

Ključne riječi: kvarovi asinkronog stroja, dijagnostika, spektralna analiza statorske struje, analiza rasipnih tokova, analiza napona osovine, frekvencijski pretvarač

12. ABSTRACT

This master thesis gives a short description of typical induction motor operational faults and an analysis of the usually applied methods for the technical diagnostics of these motor faults. By using a commercially available software program new applications for motor diagnostics based on motor current signature analysis, analysis of external search coil voltage induced by leakage flux and shaft voltage signal analysis have been developed. The developed application was checked by deliberately inducing various failures and then by comparing the results of the diagnostics of the conditions of a properly operating and the deliberately damaged engine. The developed applications were applied to the several induction motor operational faults in laboratory conditions (22 kW induction motor) and to the industrial drives in actual condition (1900 kW, 500 kW and 355 kW induction motors). Once more it was proven that the most reliable on-line method is the one based on motor current signature analysis. The shaft voltage signal and external search coil voltage signal analysis can be used to diagnose other motor failures, especially those related to the stator winding. By using the developed application for diagnosing failures in induction motors fed from frequency converters and voltage it was proven that the fault diagnostics is more difficult and less reliable due to additional parasite harmonic members in current spectrum and all the other signals, caused by the application of the frequency converter.

Key words: induction motor faults, diagnostics, motor current signature analysis, leakage flux analysis, shaft voltage analysis, frequency converter

13. ŽIVOTOPIS

Rođen sam 13. ožujka 1972. u Slavonskom Brodu, Republika Hrvatska. Osnovnu školu završio sam u Zagrebu, nakon koje upisujem "Matematičko informatički obrazovni centar – Vladimir Popović". Maturirao sam 1990. godine.

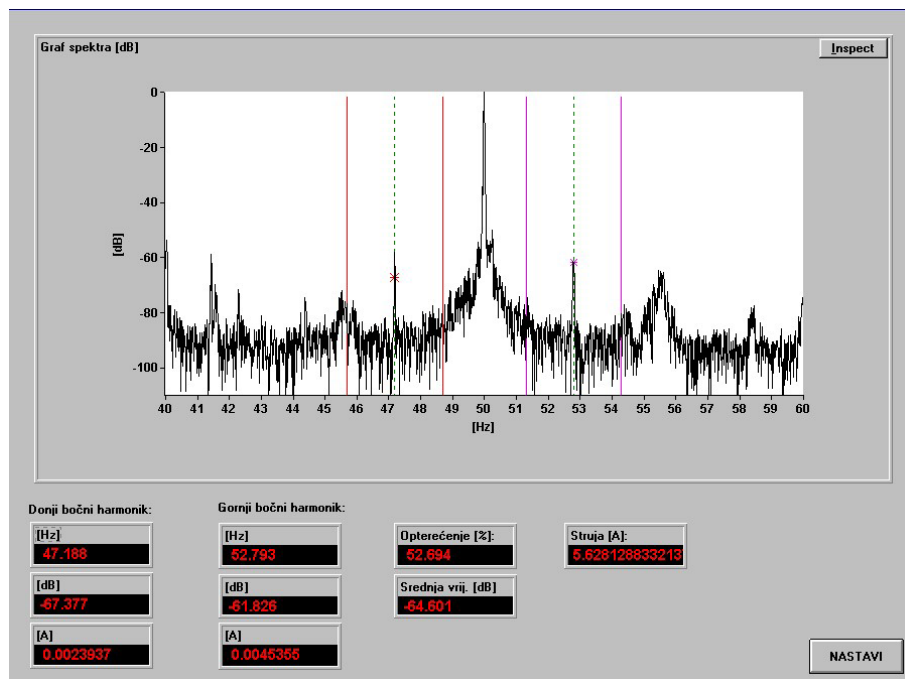
Nakon završene srednje škole upisujem Elektrotehnički fakultet (danas Fakultet elektrotehnike i računarstva) u Zagrebu. Diplomirao sam 10. 5. 1995. na smjeru Elektrostrojarstvo u i automatizacija, na temi "Finalizacija sustava digitalne regulacije napona sinkronog generatora".

Nakon završetka studija zaposlio sam se u tvornici KONČAR – Generatori, gdje sam radio dvije godine, na poslovima vezanim uz regulaciju napona sinkronog generatora.

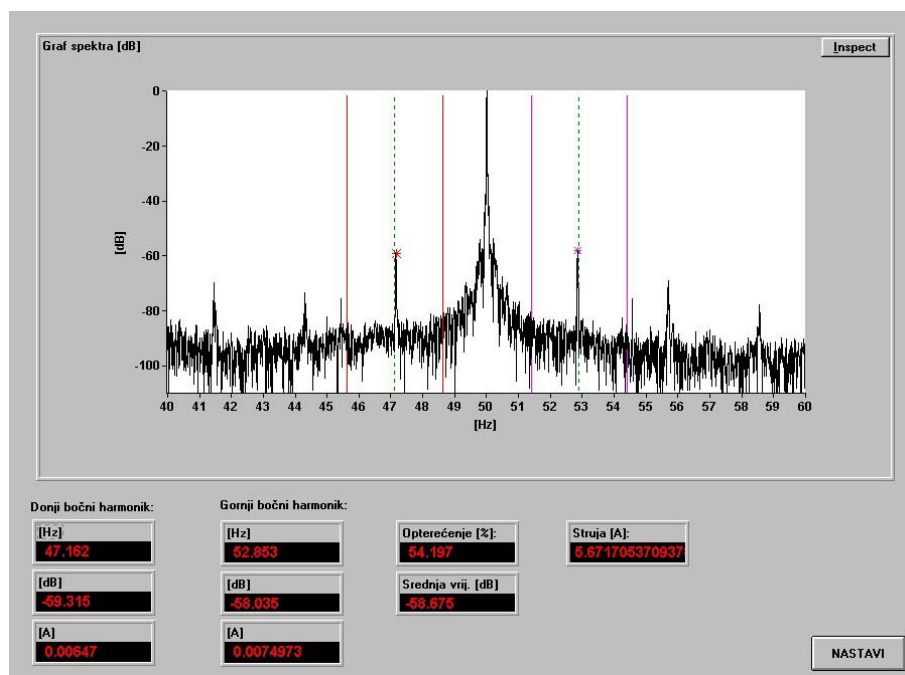
Na Zavodu za elektrostrojarstvo i automatizaciju zapošljava se 1998. godine na mjestu mlađeg asistenta, gdje radim i danas.

PRILOG A-1

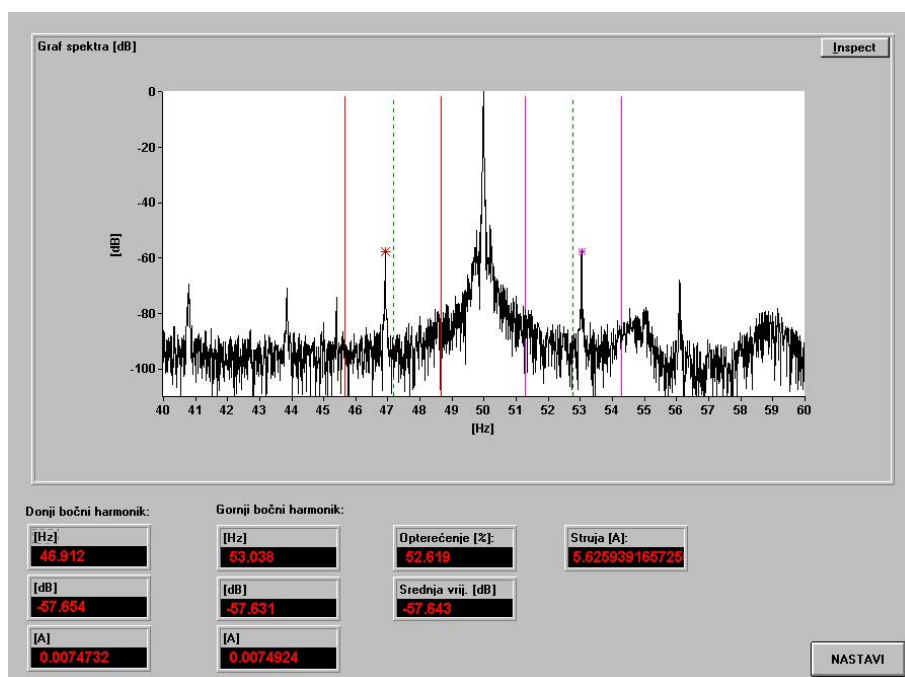
Spektri asinkronog stroja AZ100L snimljeni za različite frekvencije uzorkovanja.



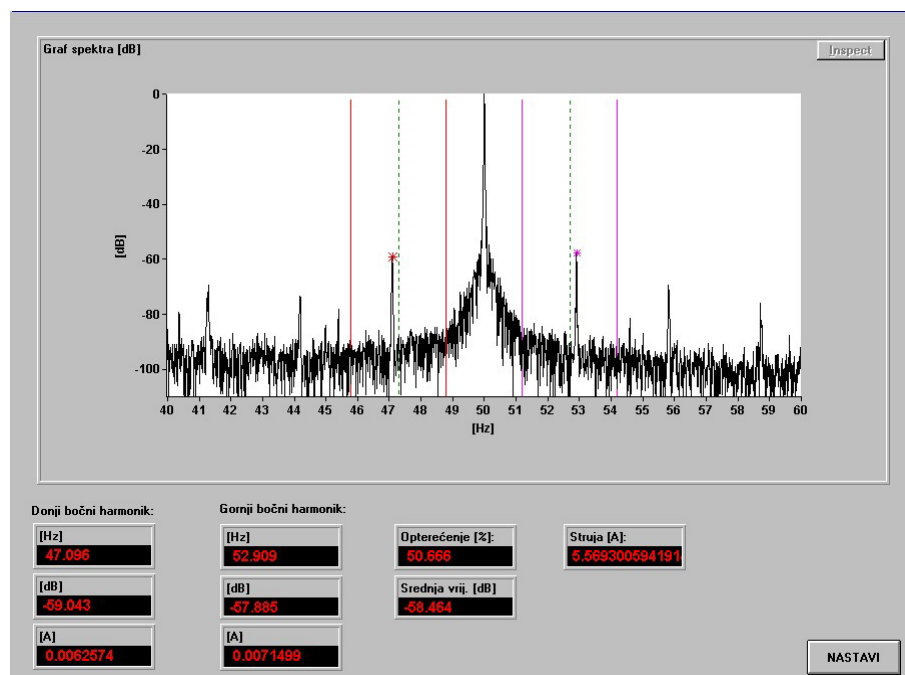
$$f_u = 140 \text{ Hz}$$



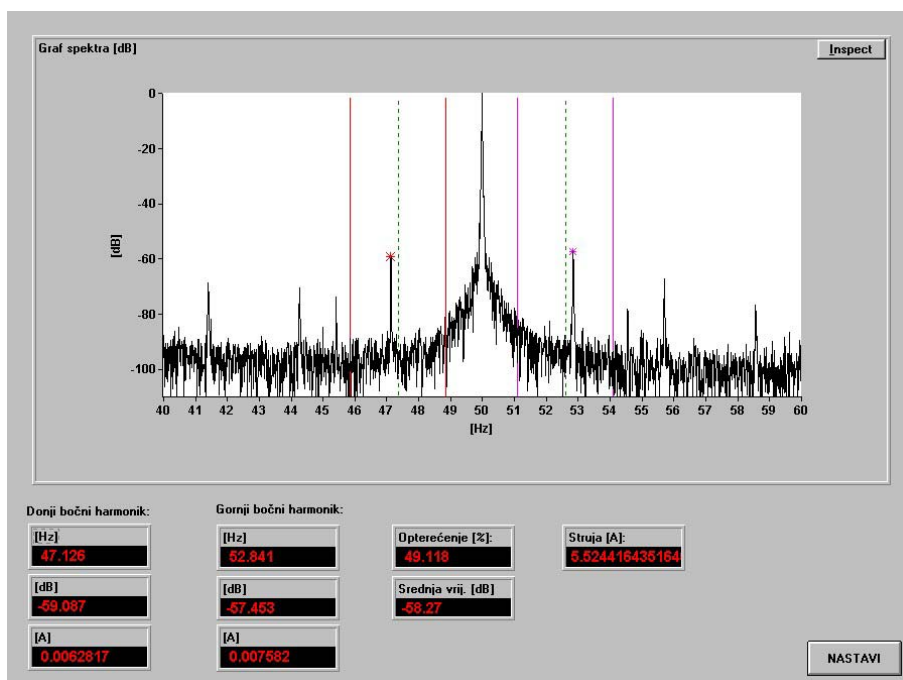
$$f_u = 250 \text{ Hz}$$



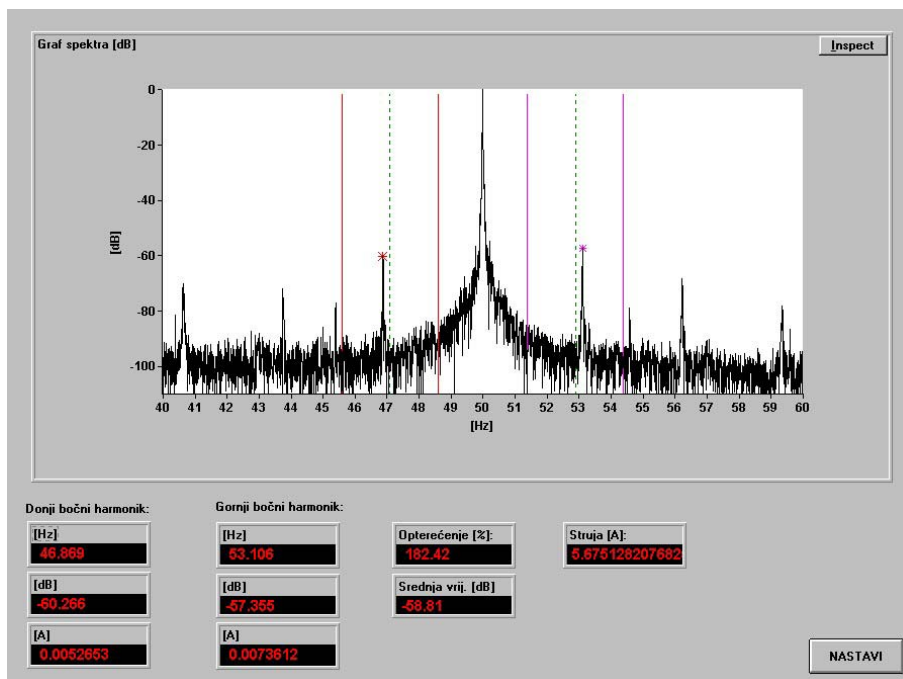
$$f_u = 500 \text{ Hz}$$



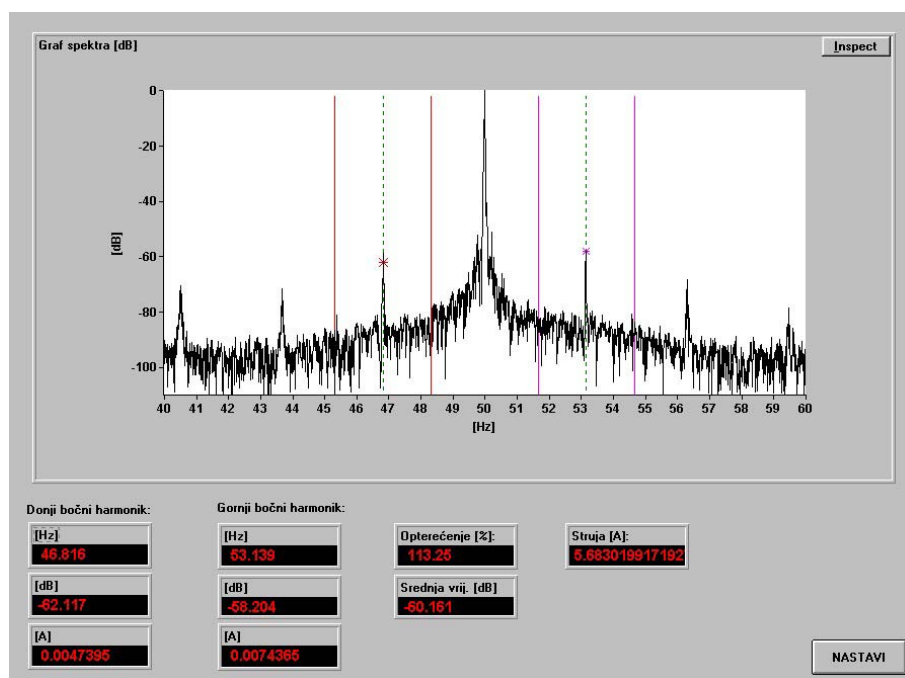
$$f_u = 1000 \text{ Hz}$$



$$f_u = 2000 \text{ Hz}$$



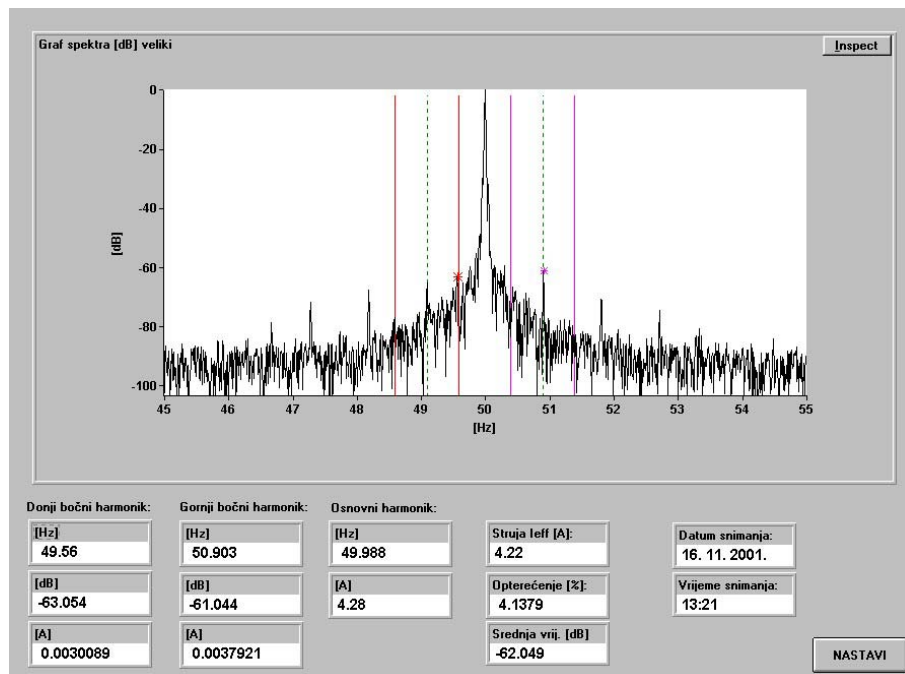
$$f_u = 3000 \text{ Hz}$$



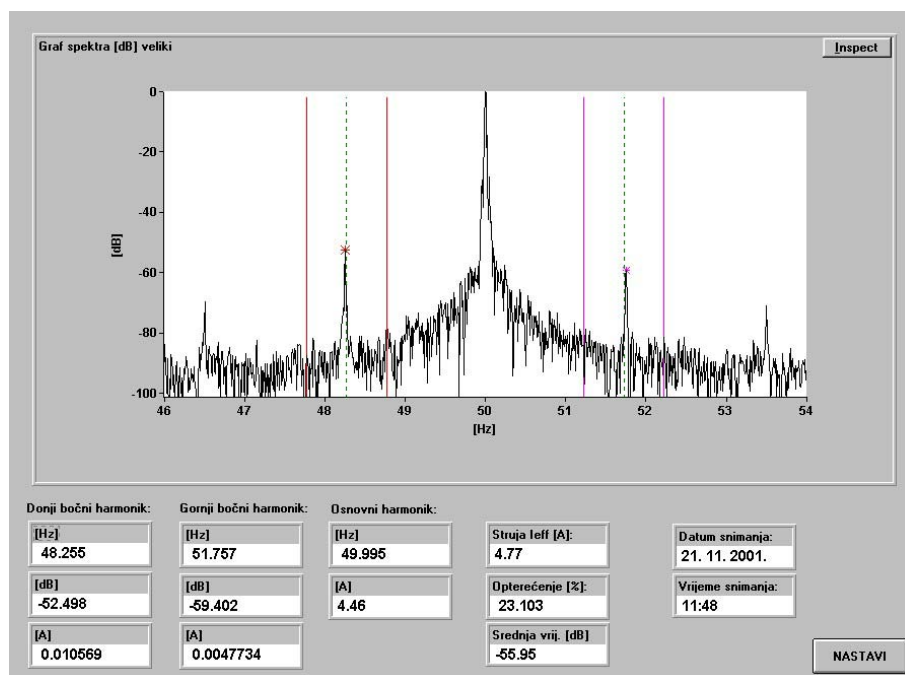
$$f_u = 5000 \text{ Hz}$$

PRILOG A-2

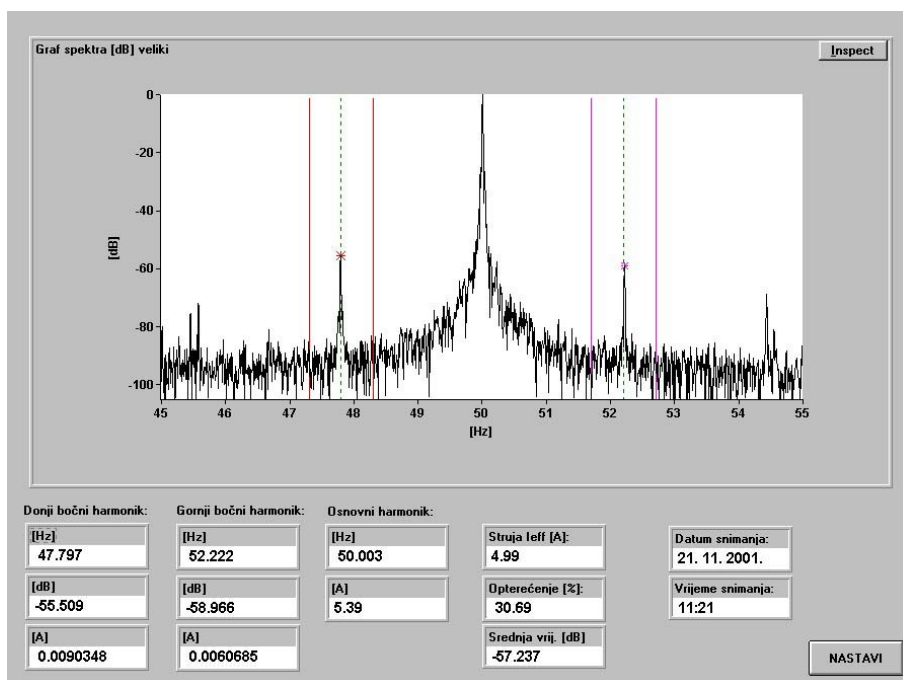
Spektri struje asinkronog stroja AZ100L za različita opterećenja.



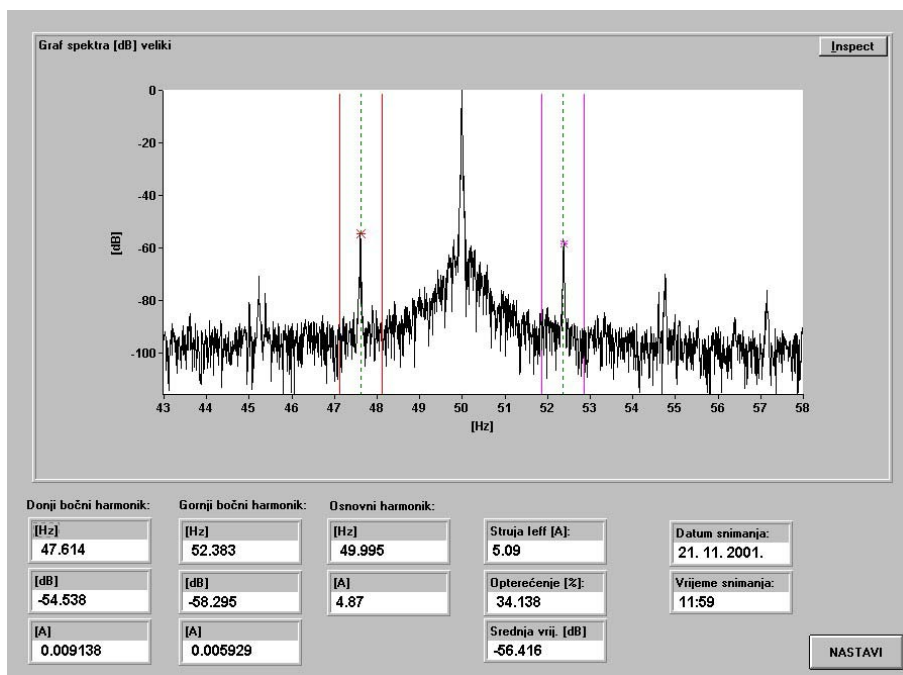
Opterećenje 4.5 A



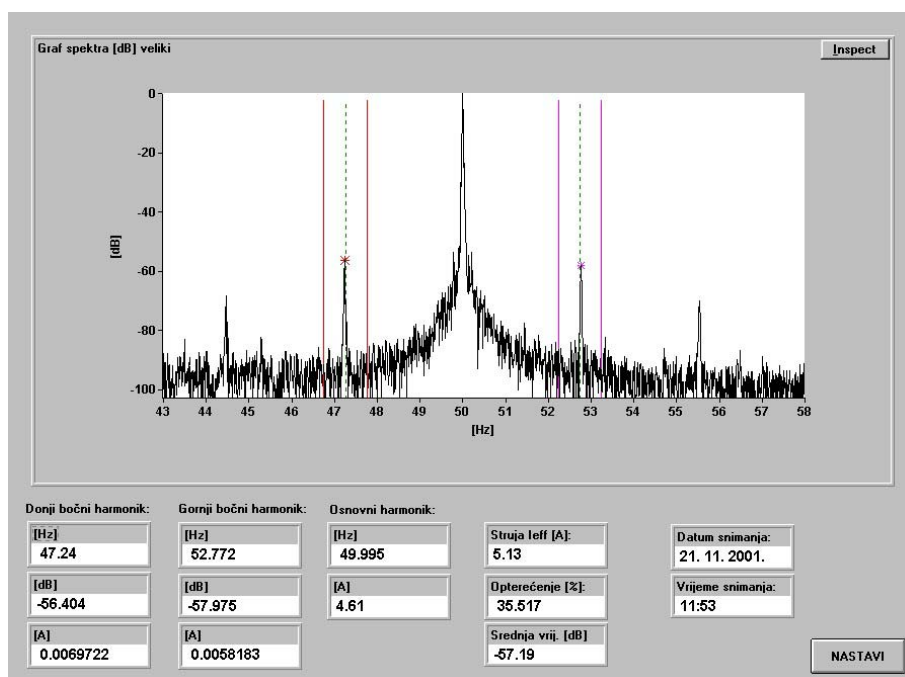
Opterećenje 5 A



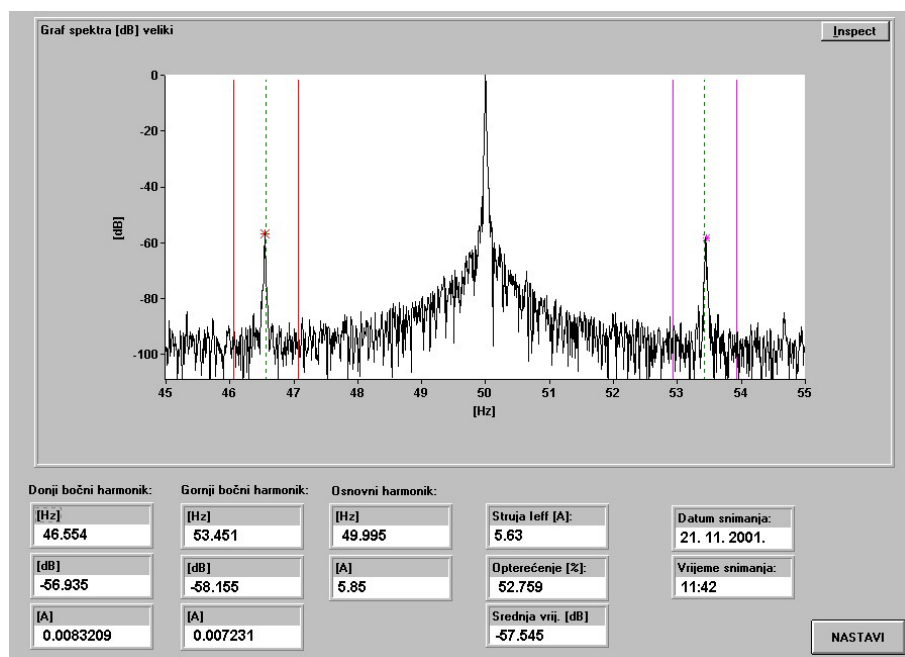
Opterećenje 5.3 A



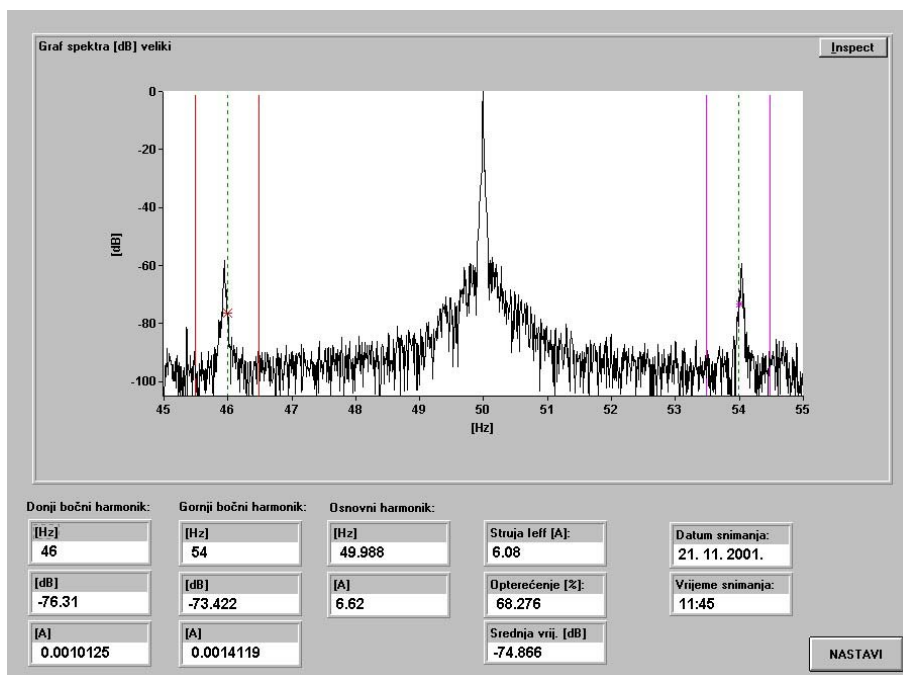
Opterećenje 5.4 A



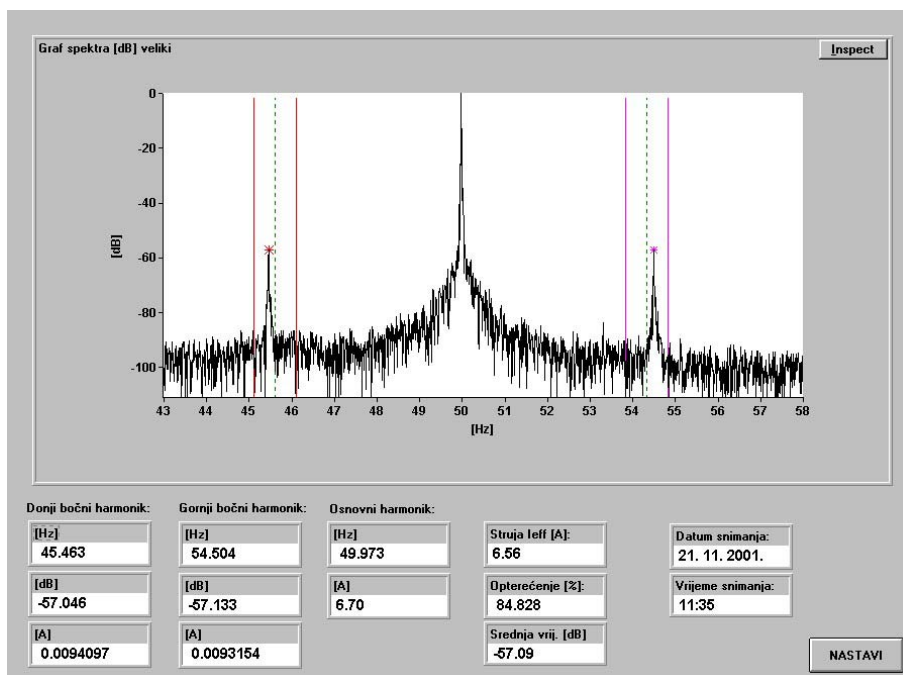
Opterećenje 5.5 A



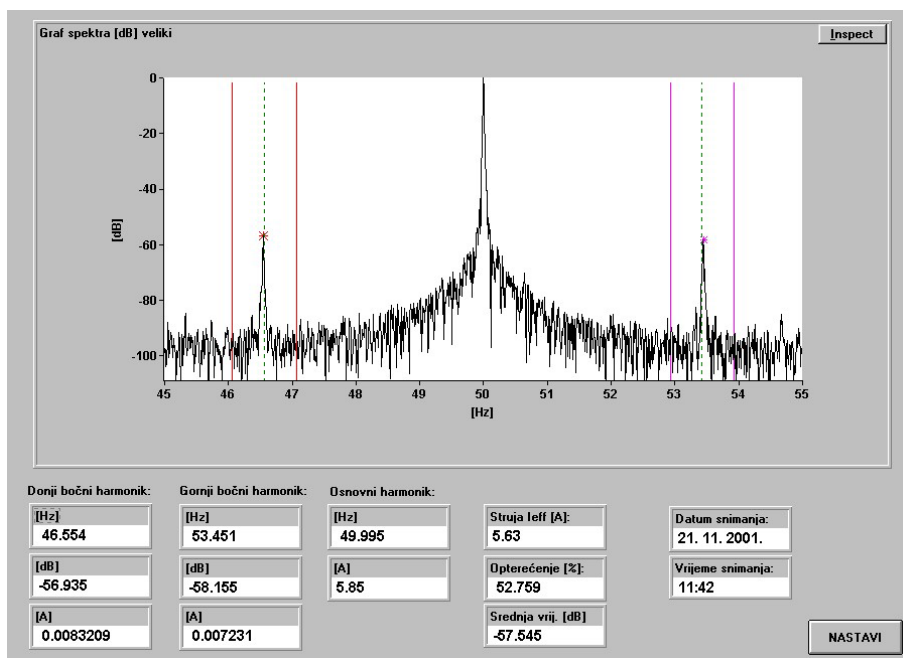
Opterećenje 6 A



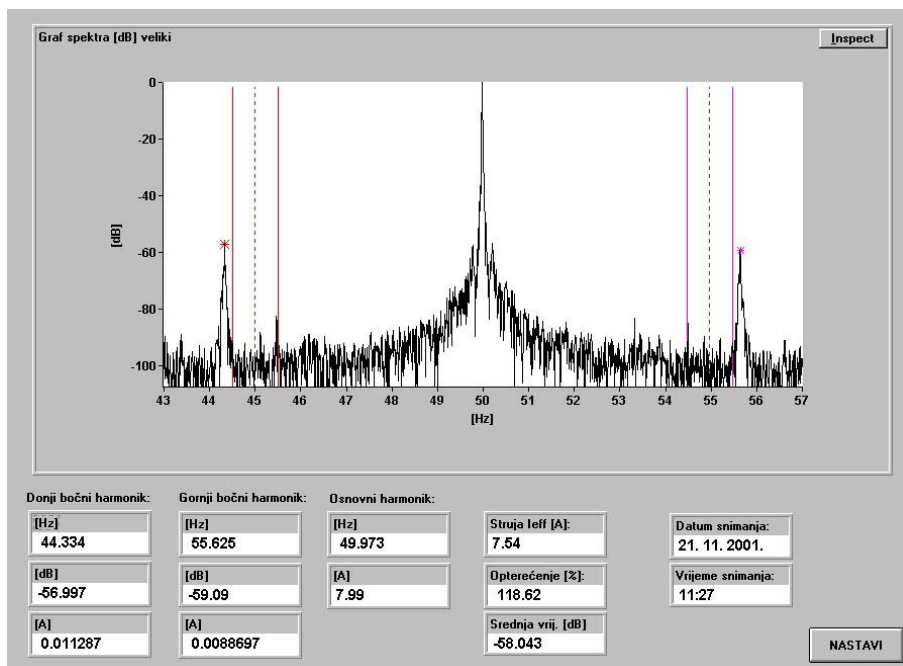
Opterećenje 6.5 A



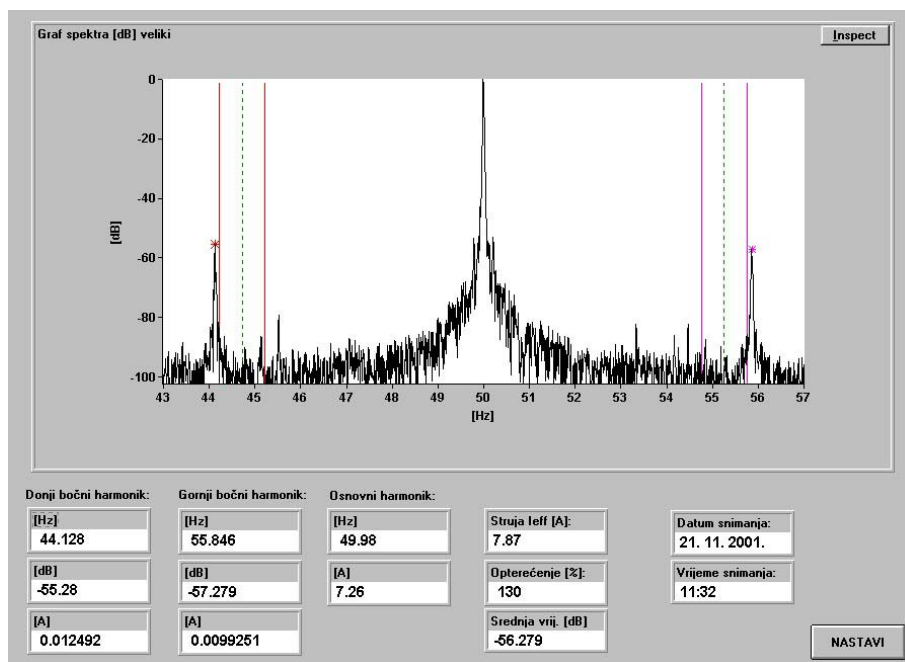
Opterećenje 7 A



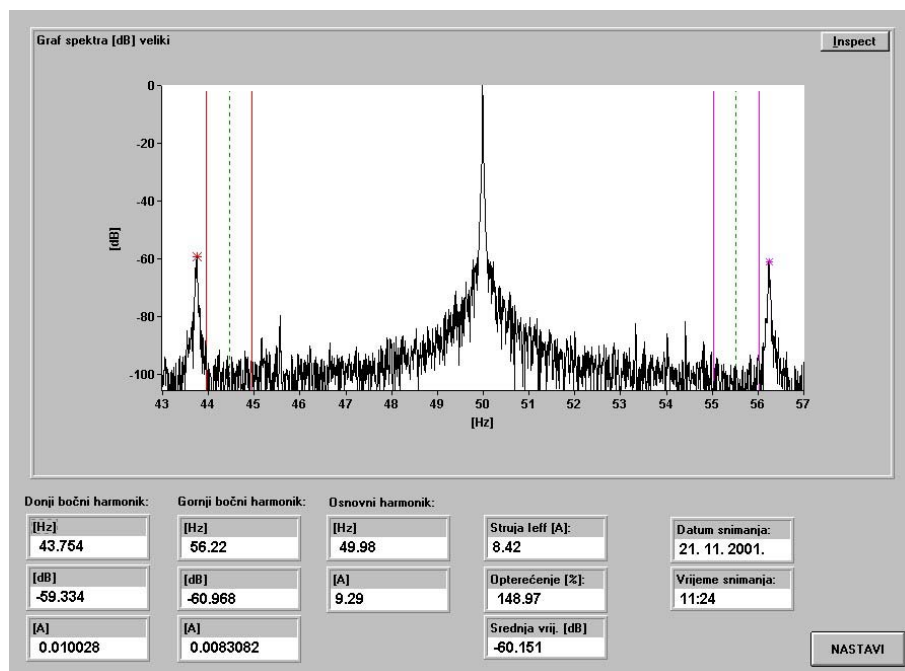
Opterećenje 7.5 A



Opterećenje 8 A



Opterećenje 8.5 A

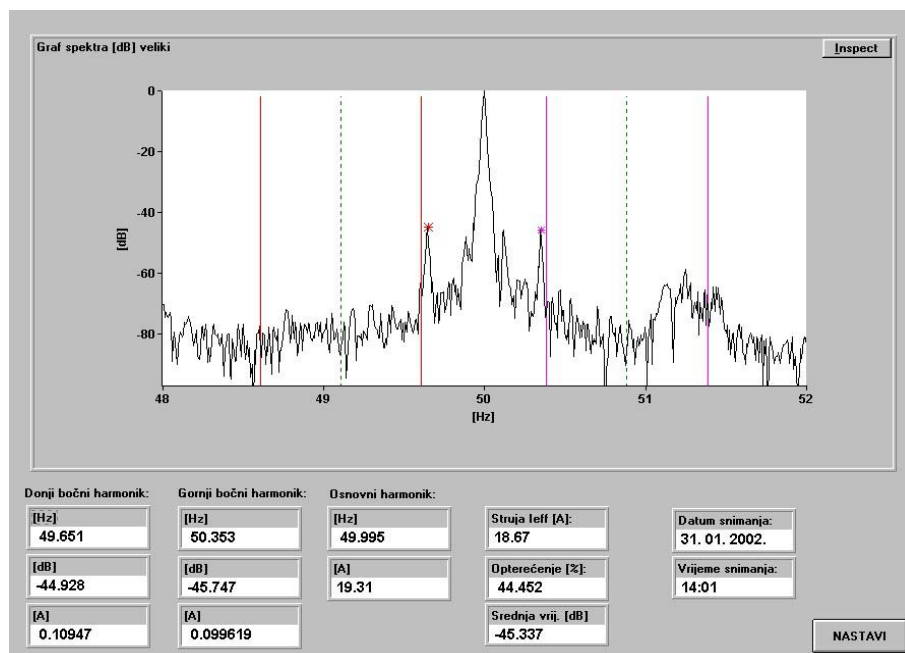


Opterećenje 9 A

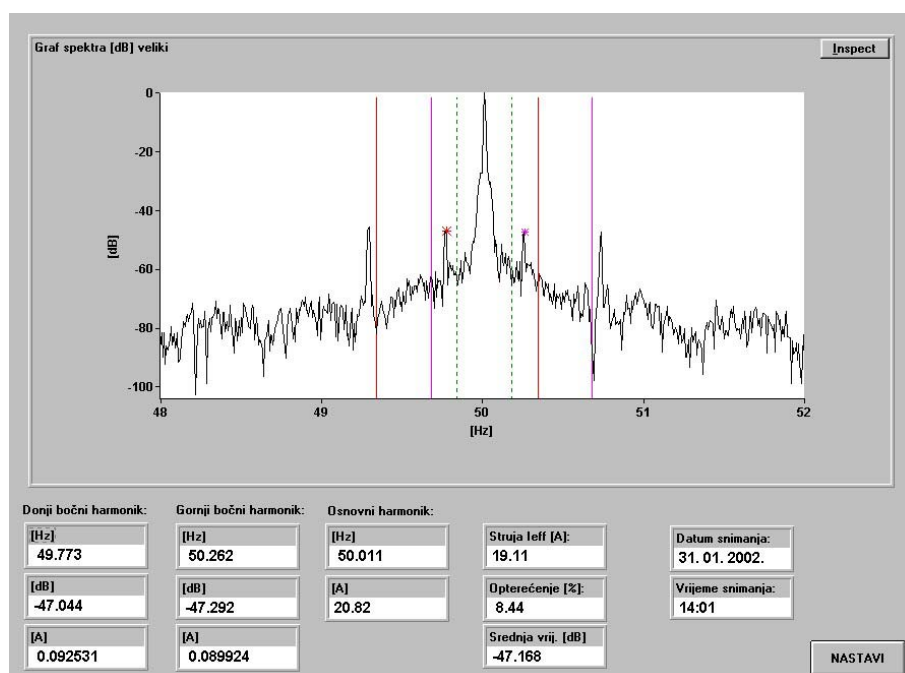
PRILOG B

Izgled spektara za različita opterećenja i različita stanja rotorskog kaveza, pri radu na krutoj mreži.

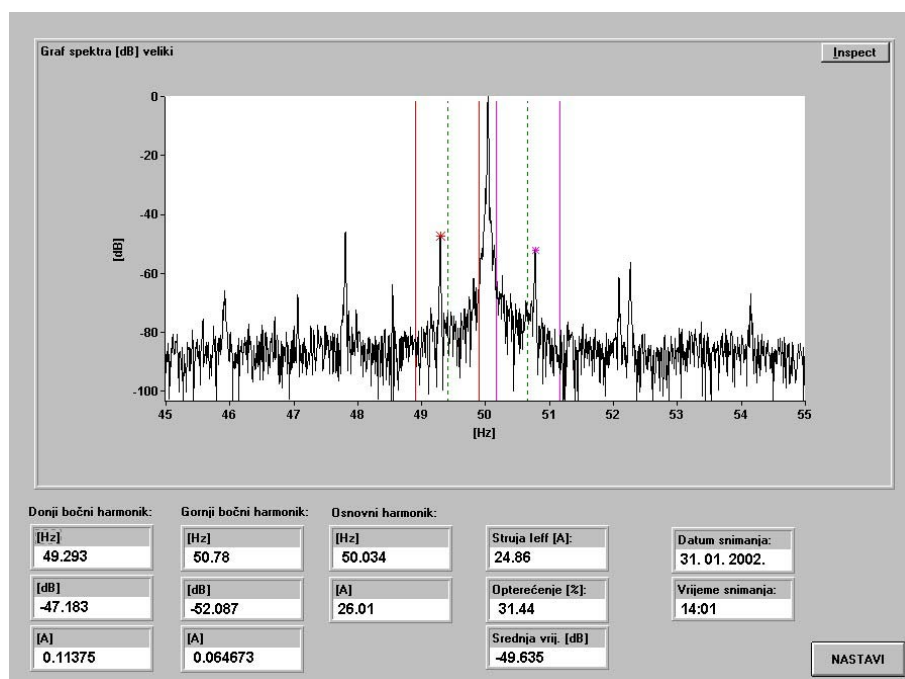
Stanje 2 – Stroj sa ispravnim kavezom



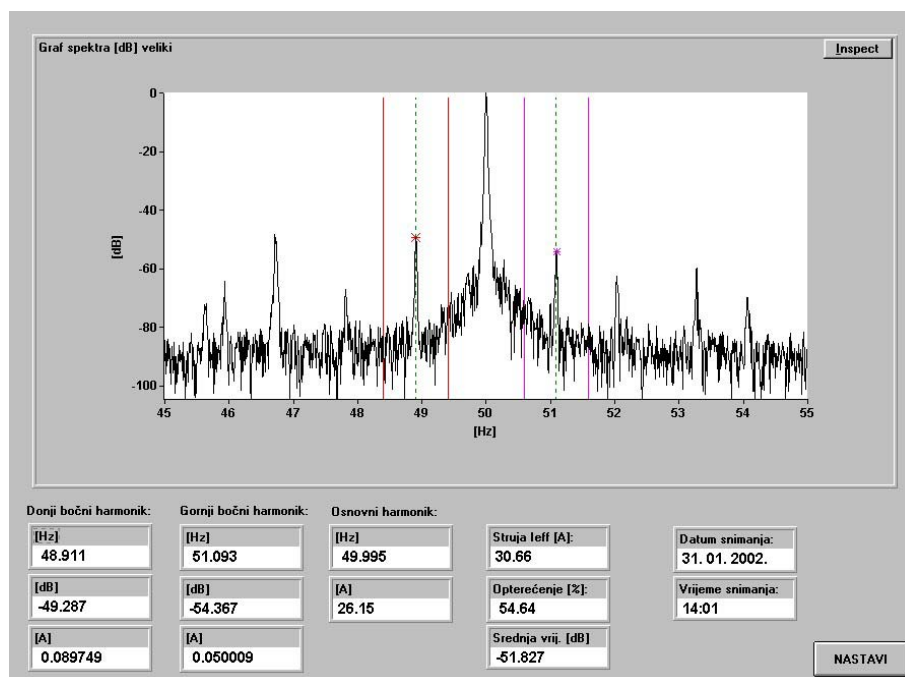
a) prazni hod



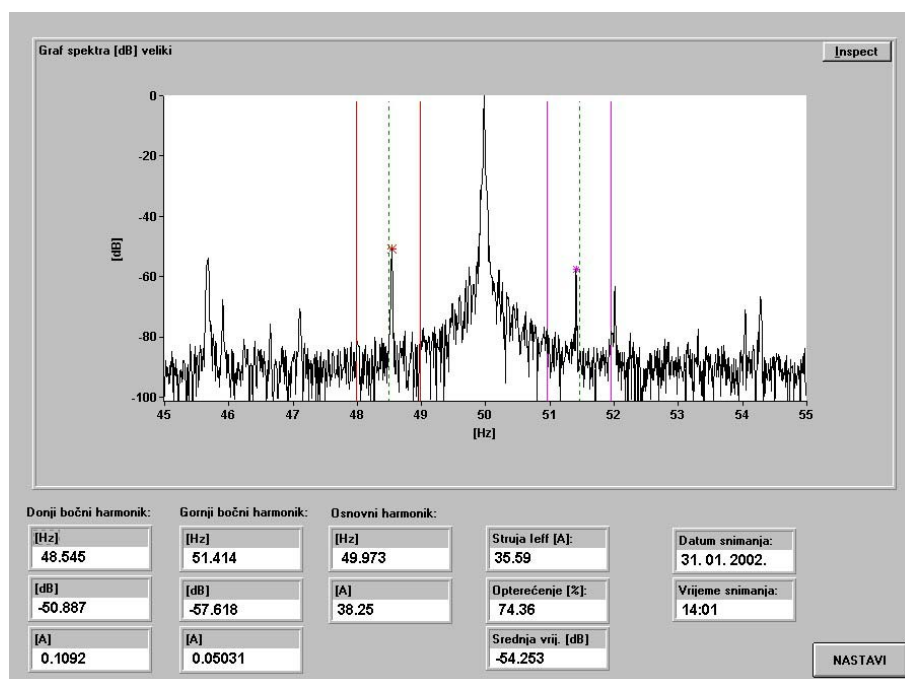
b) opterećenje 20 A



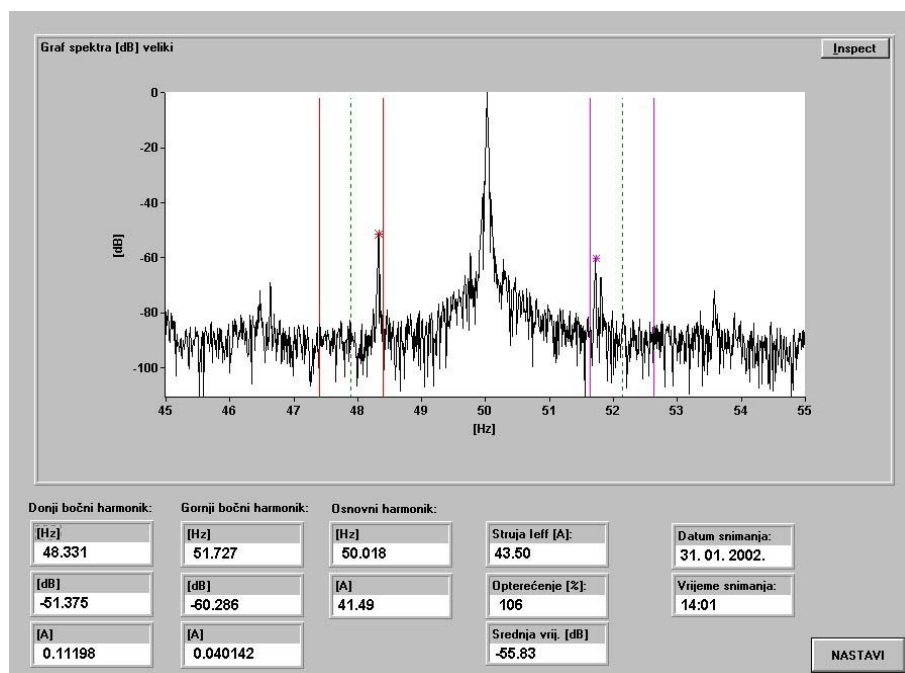
c) opterećenje 25 A



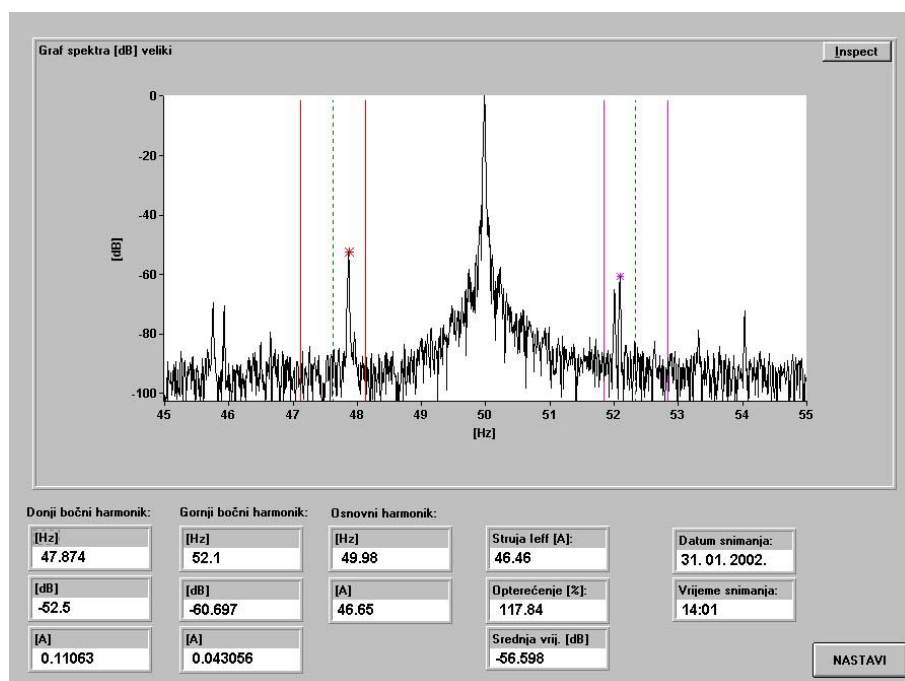
d) opterećenje 30 A



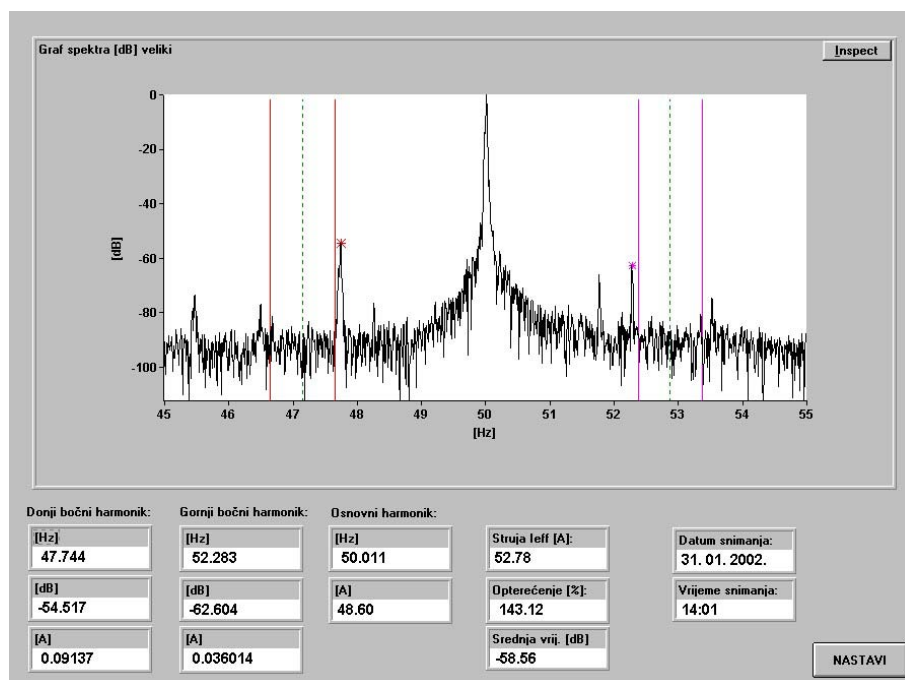
e) opterećenje 35 A



f) opterećenje 40 A

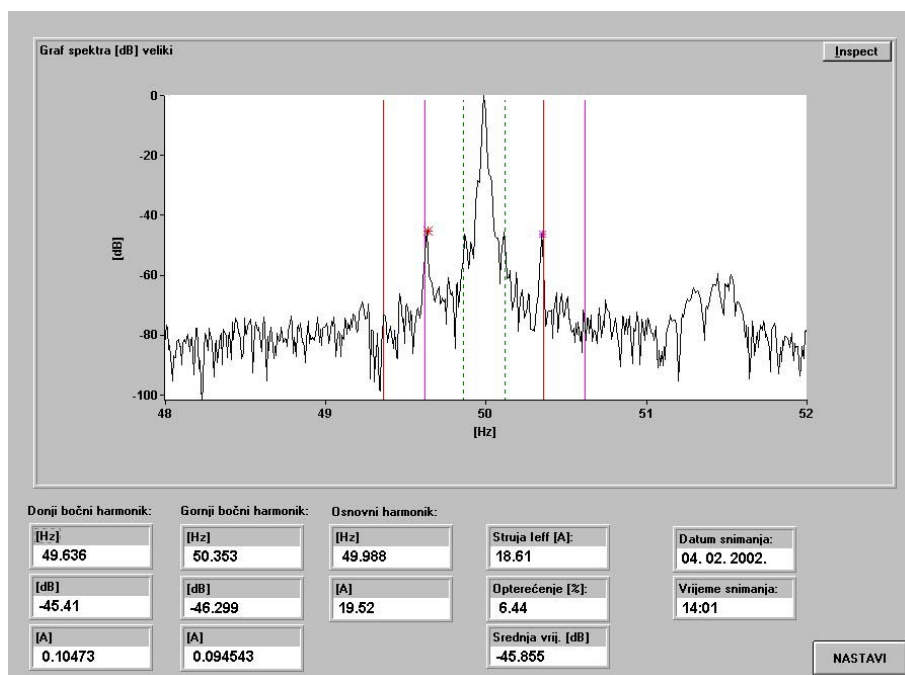


g) opterećenje 45 A

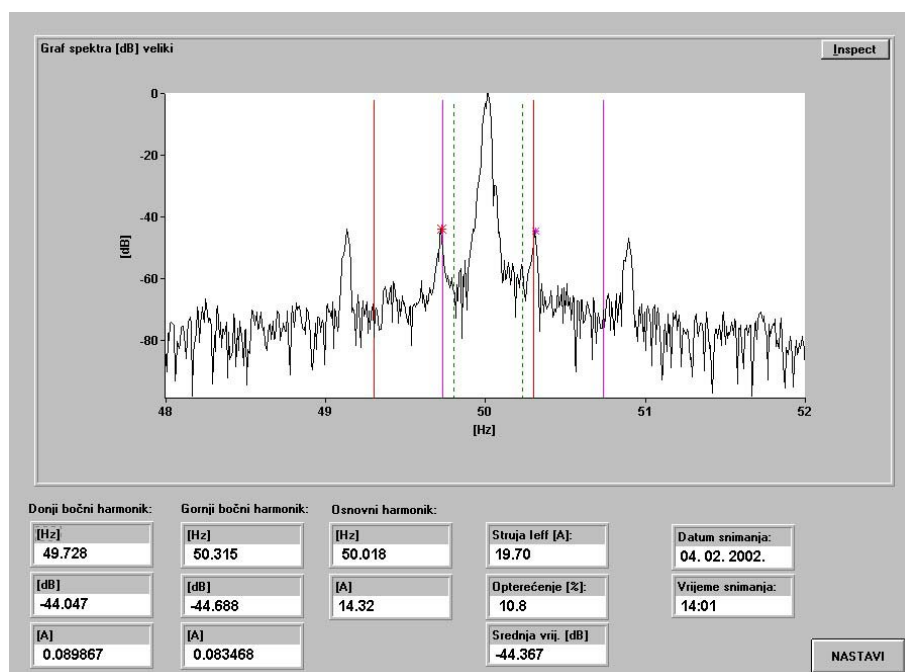


h) opterećenje 50 A

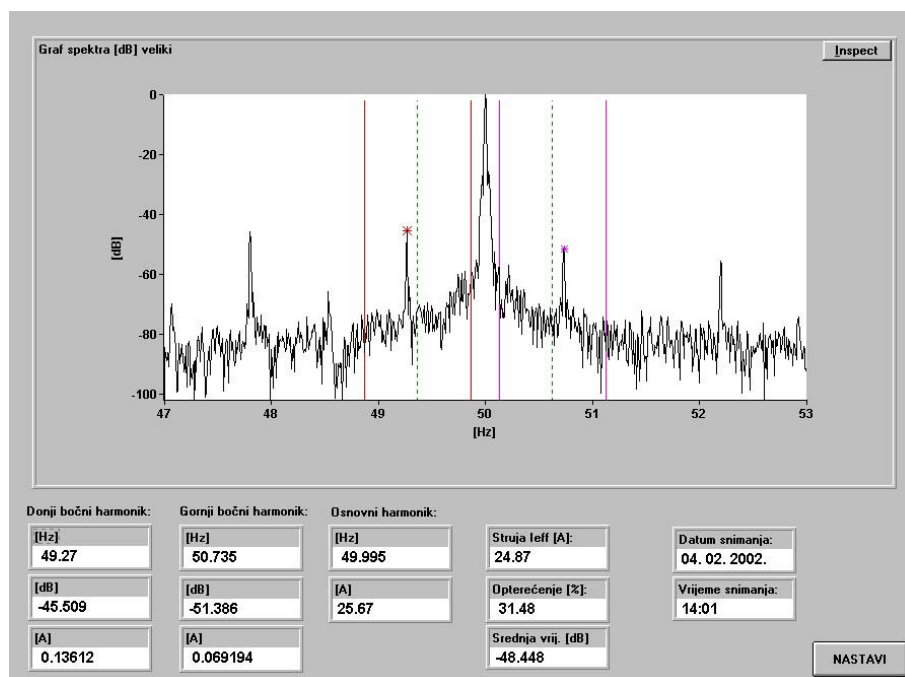
Stanje 3 – Stroj sa početnim oštećenjem jednog štapa



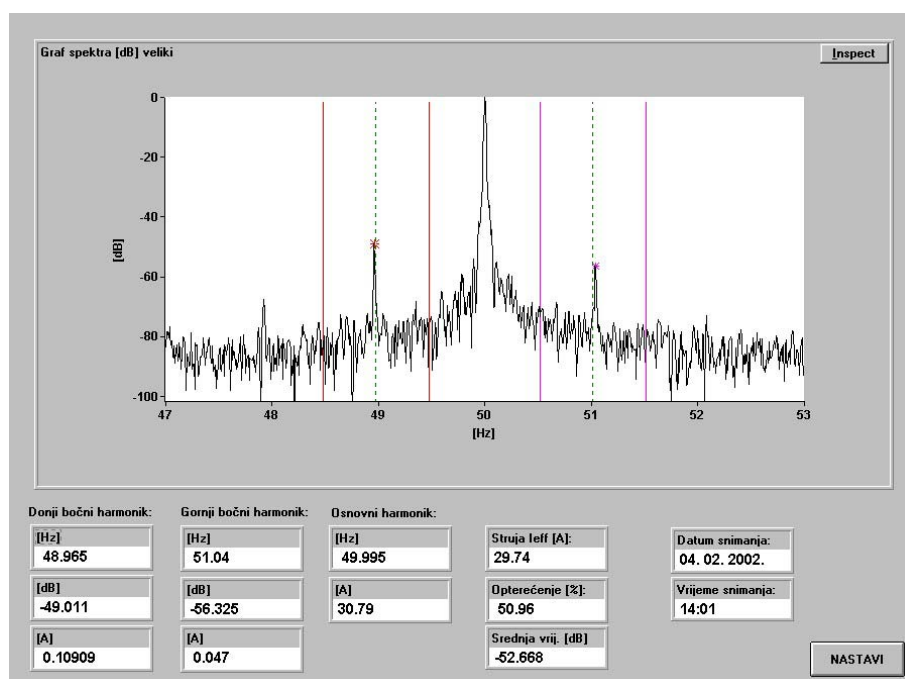
a) prazni hod



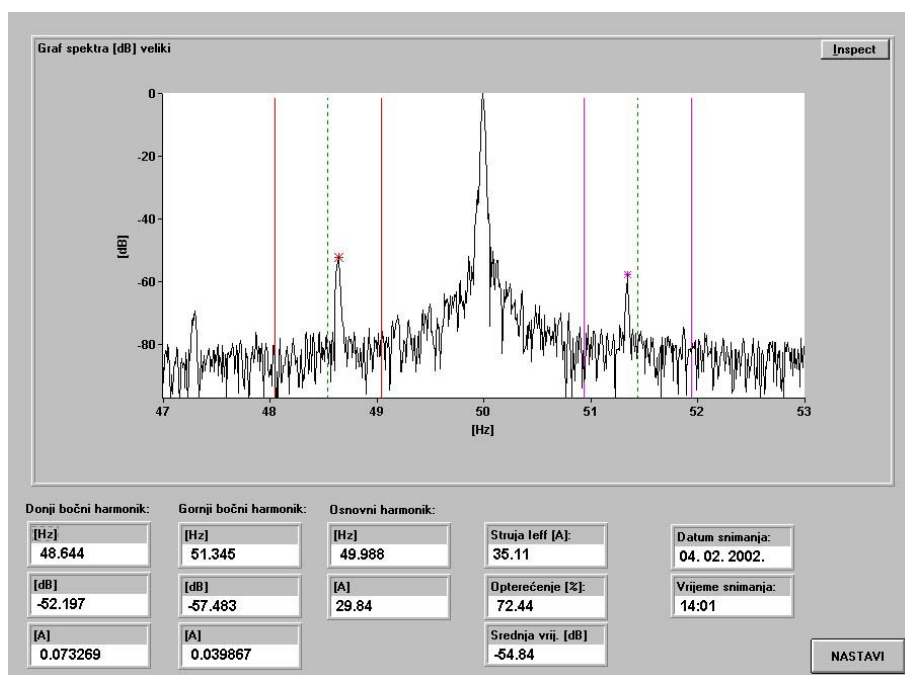
b) opterećenje 20 A



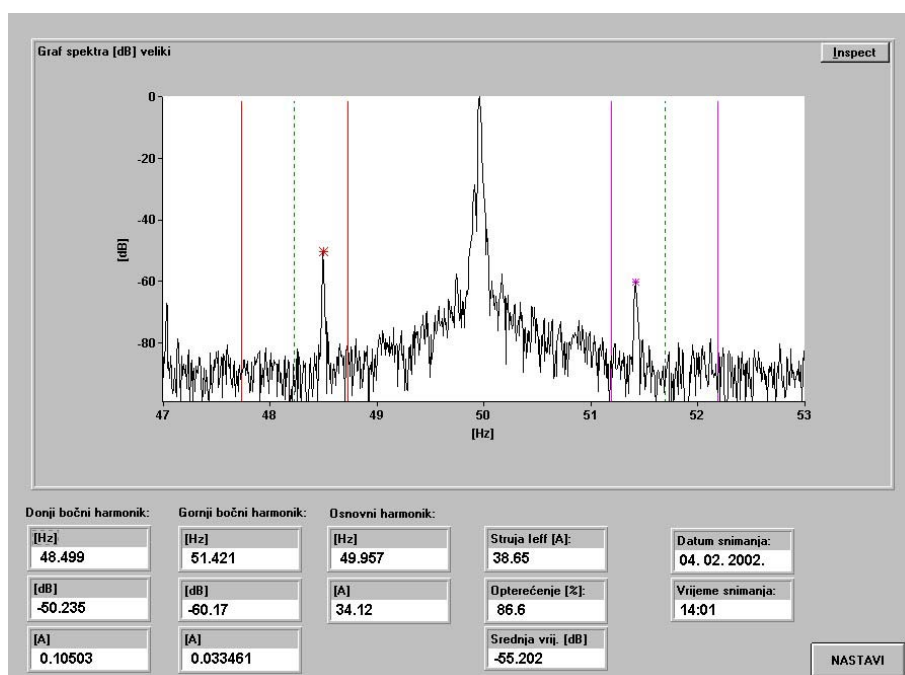
c) opterećenje 25 A



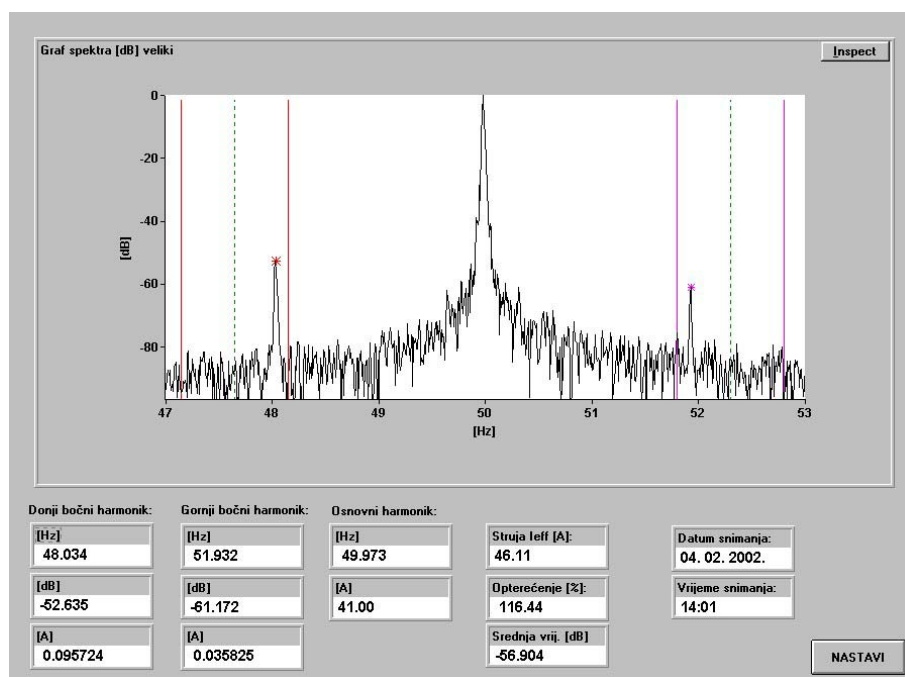
d) opterećenje 30 A



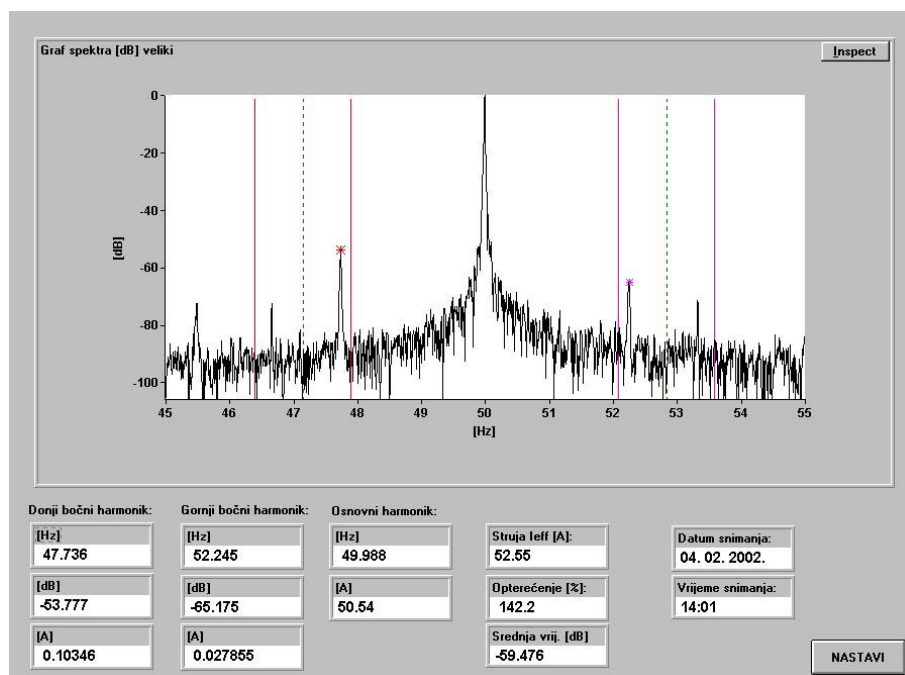
e) opterećenje 35 A



f) opterećenje 40 A

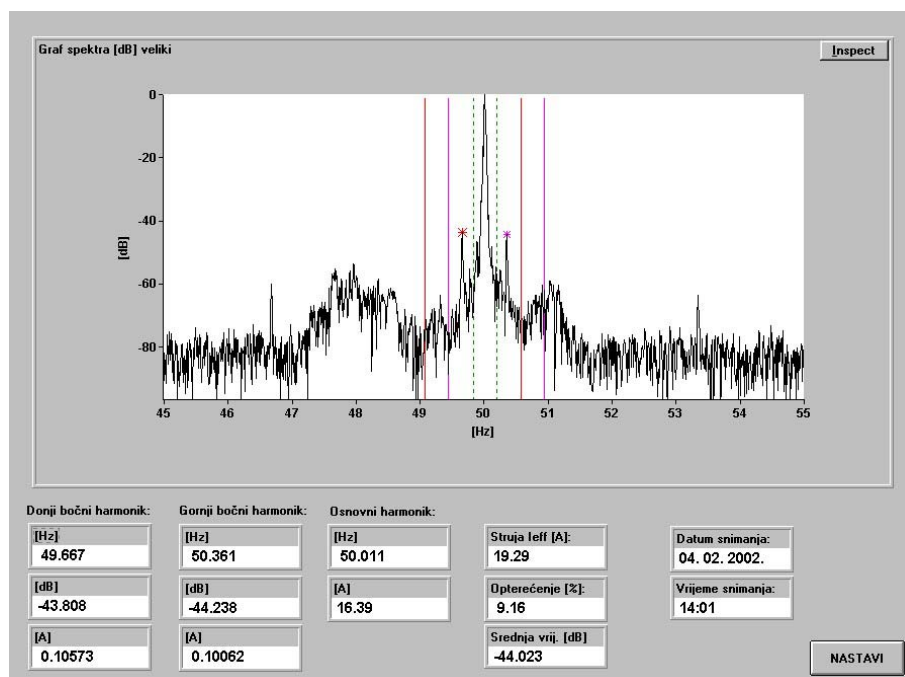


g) opterećenje 45 A

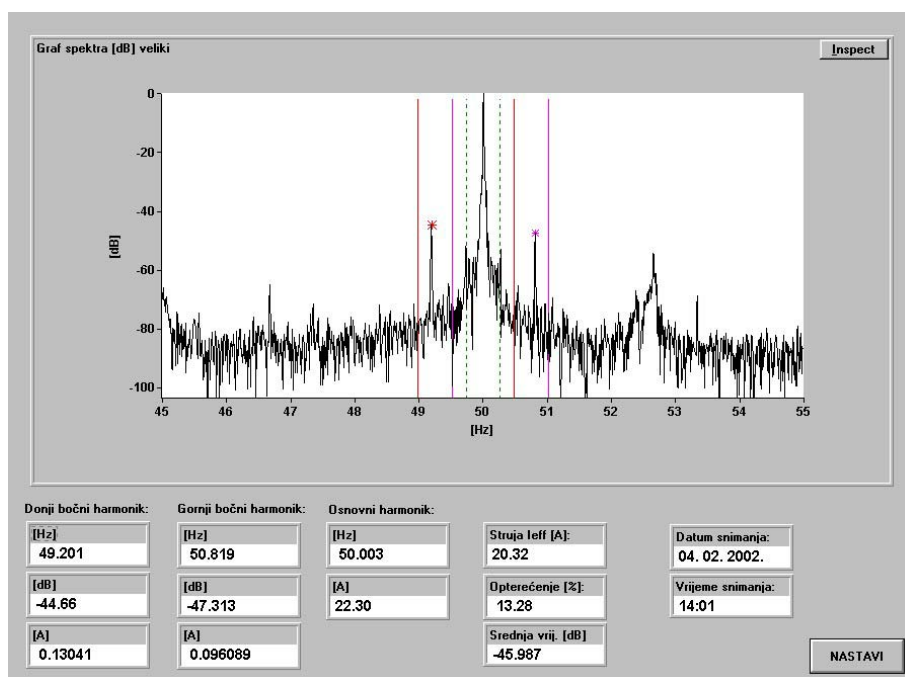


h) opterećenje 50 A

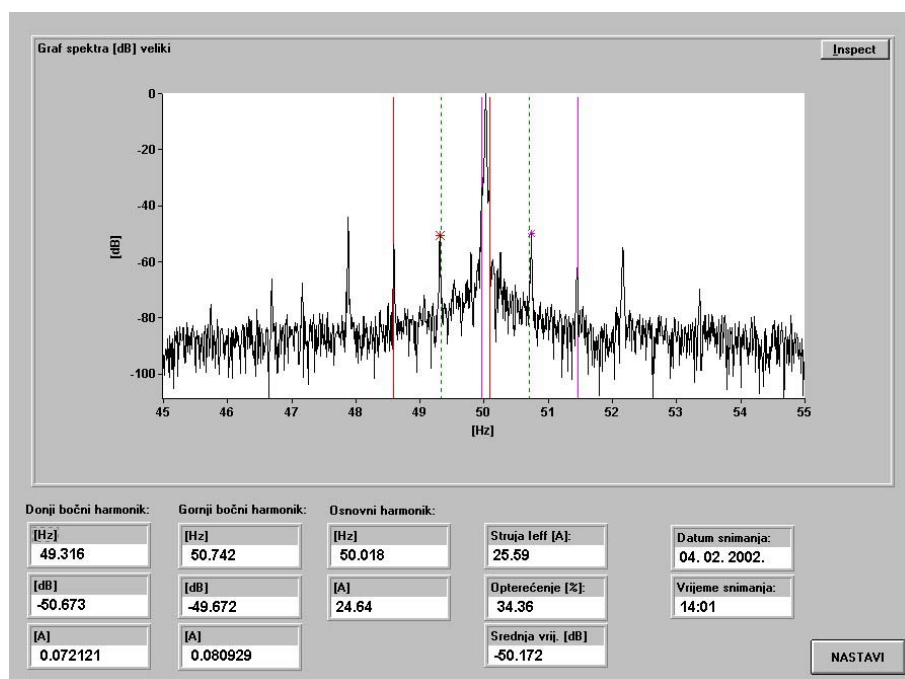
Stanje 4 – Stroj sa jednim prerezanim štapom



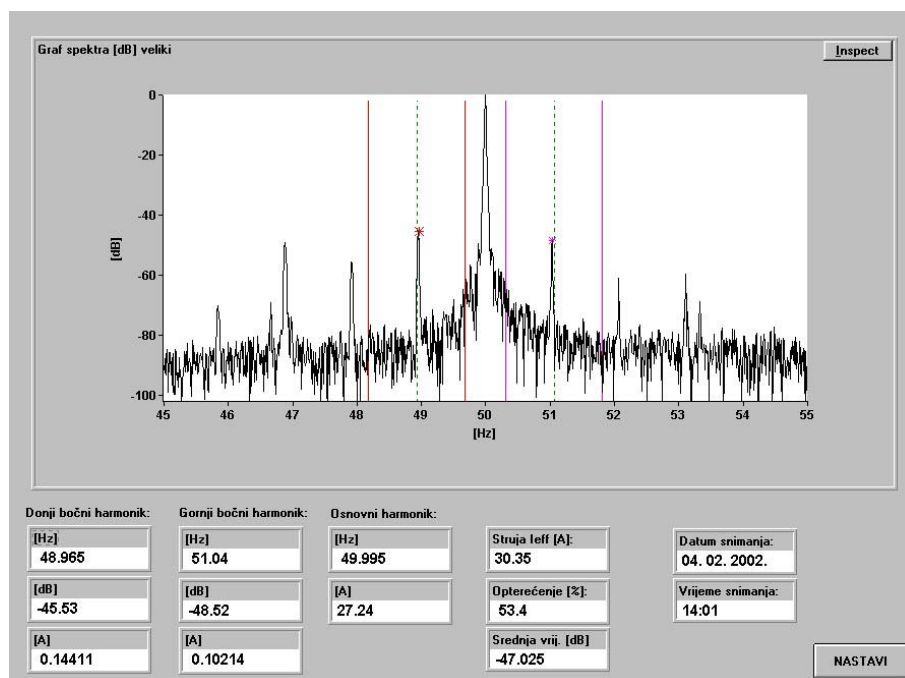
a) prazni hod



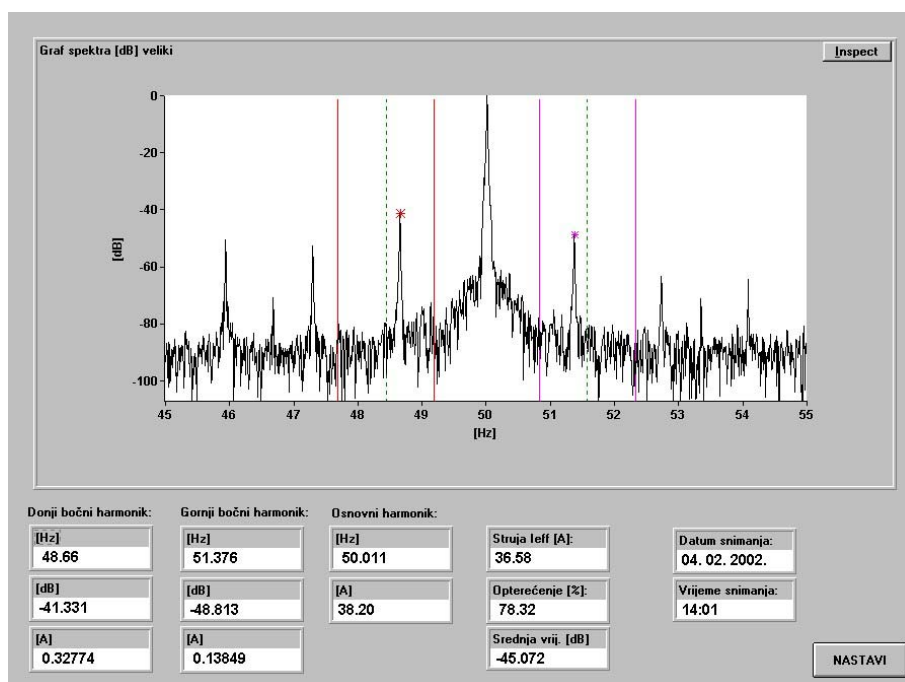
b) opterećenje 20 A



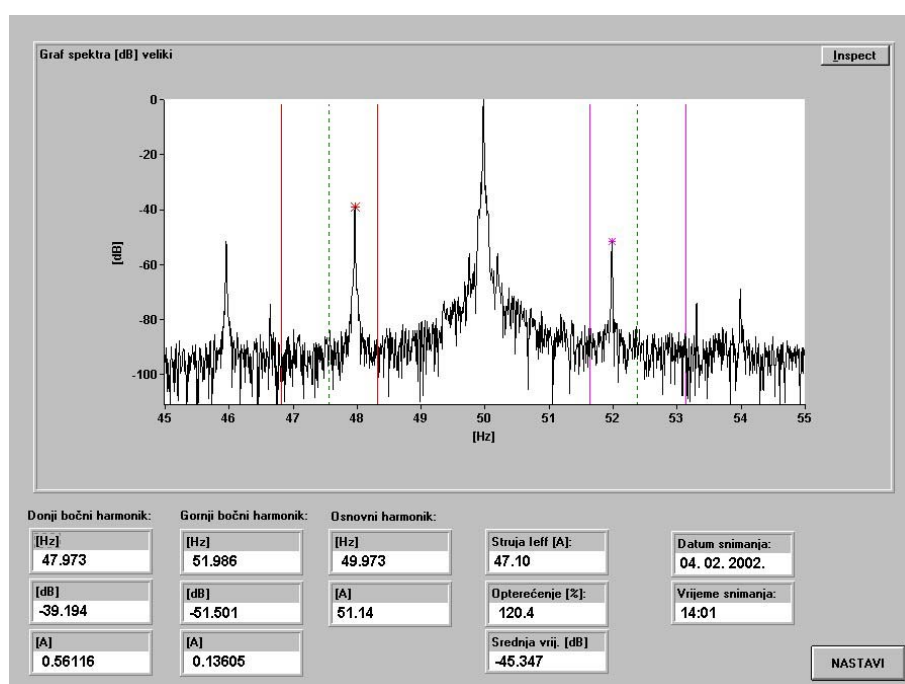
c) opterećenje 25 A



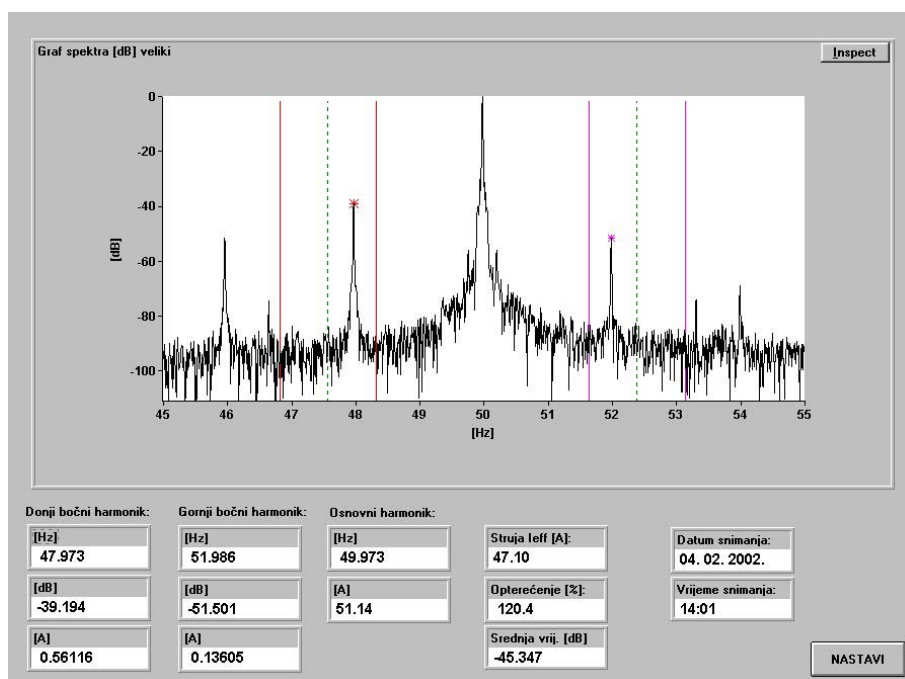
d) opterećenje 30 A



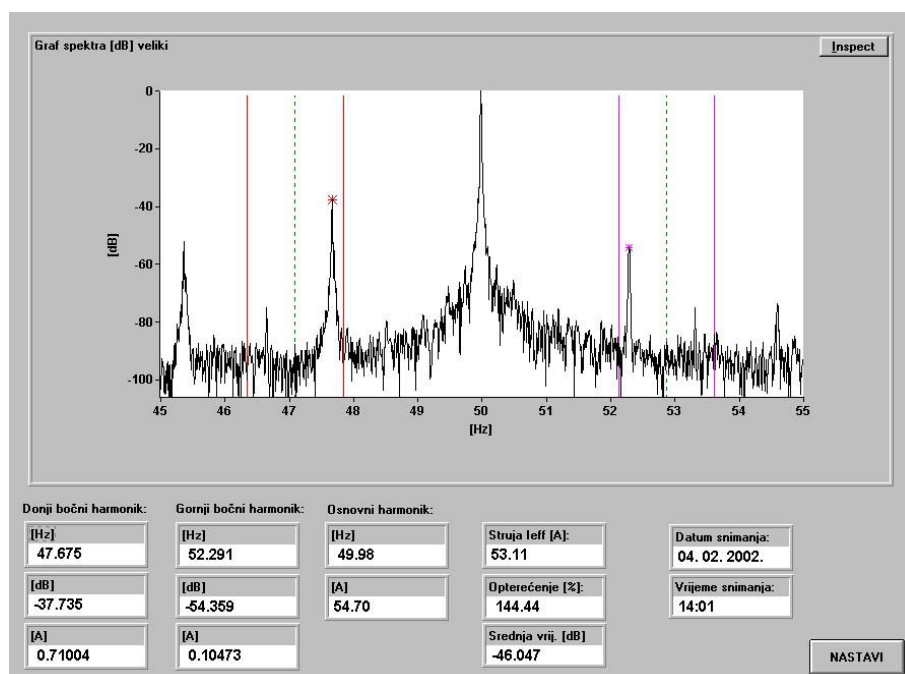
e) opterećenje 35 A



f) opterećenje 40 A

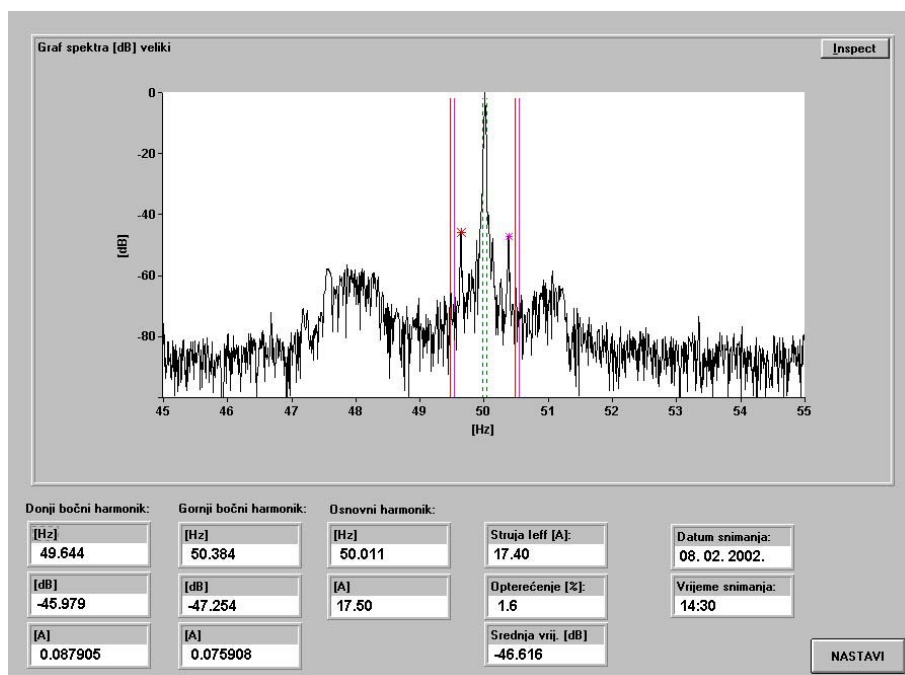


g) opterećenje 45 A

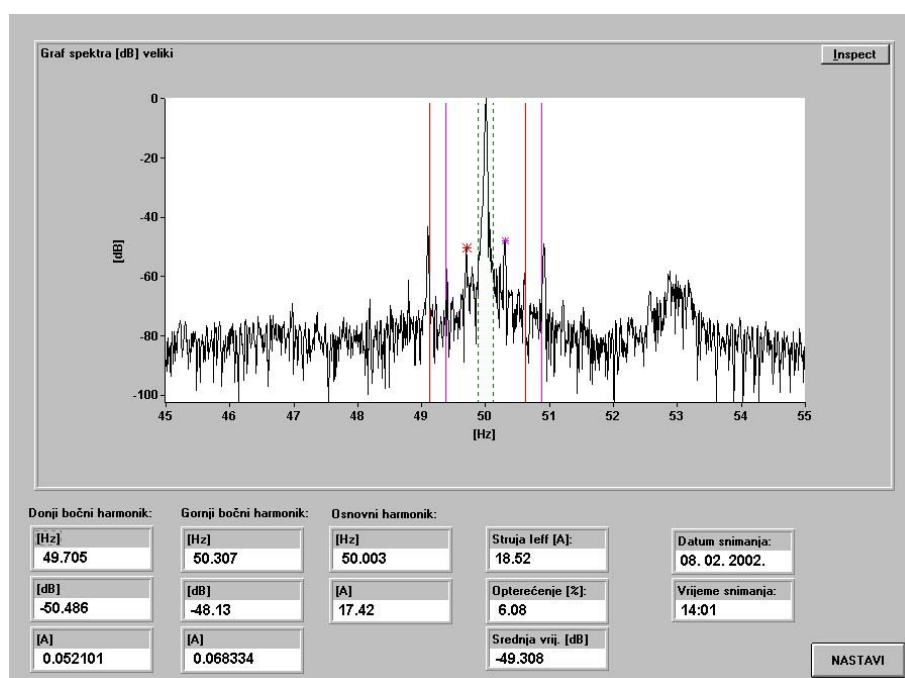


h) opterećenje 50 A

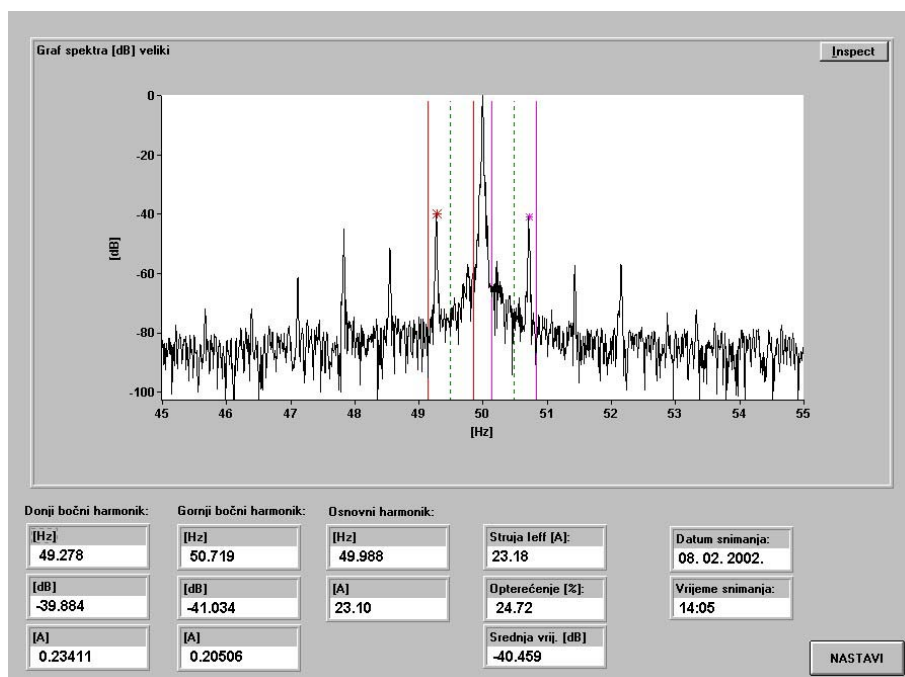
Stanje 5 – Stroj sa dva prerezana štapa



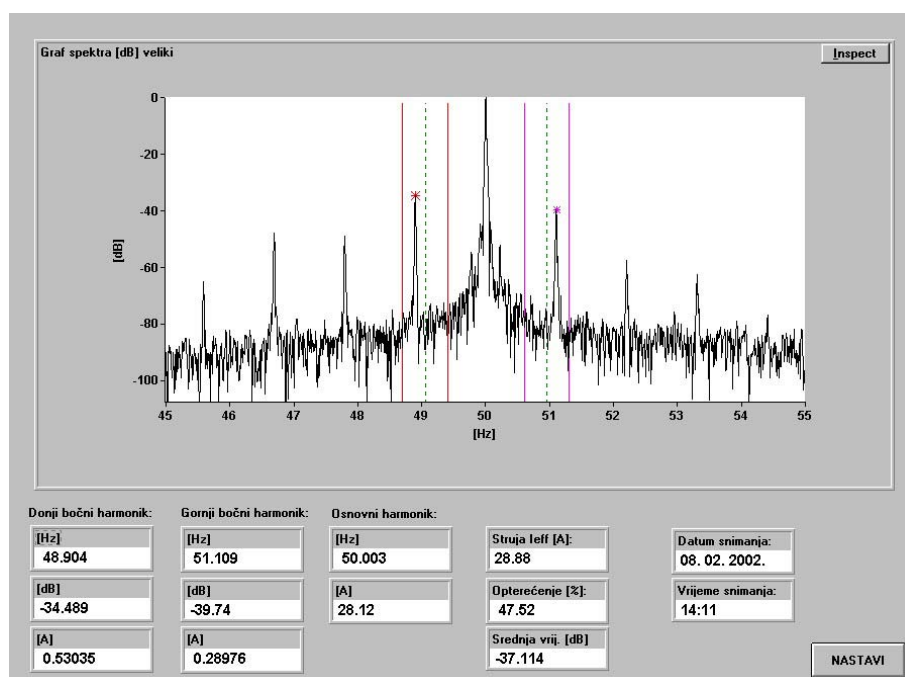
a) prazni hod



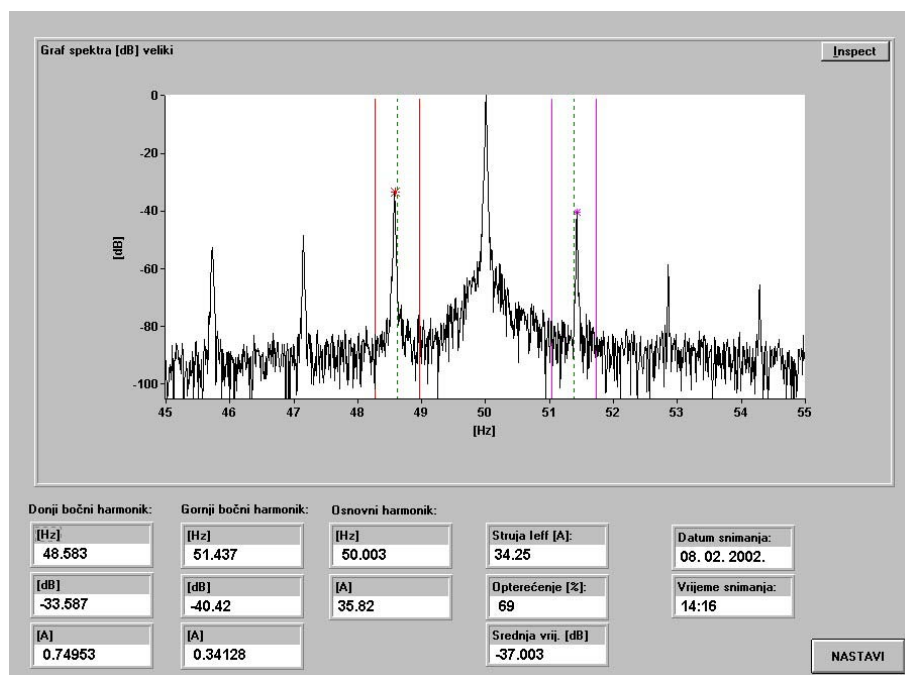
b) opterećenje 20 A



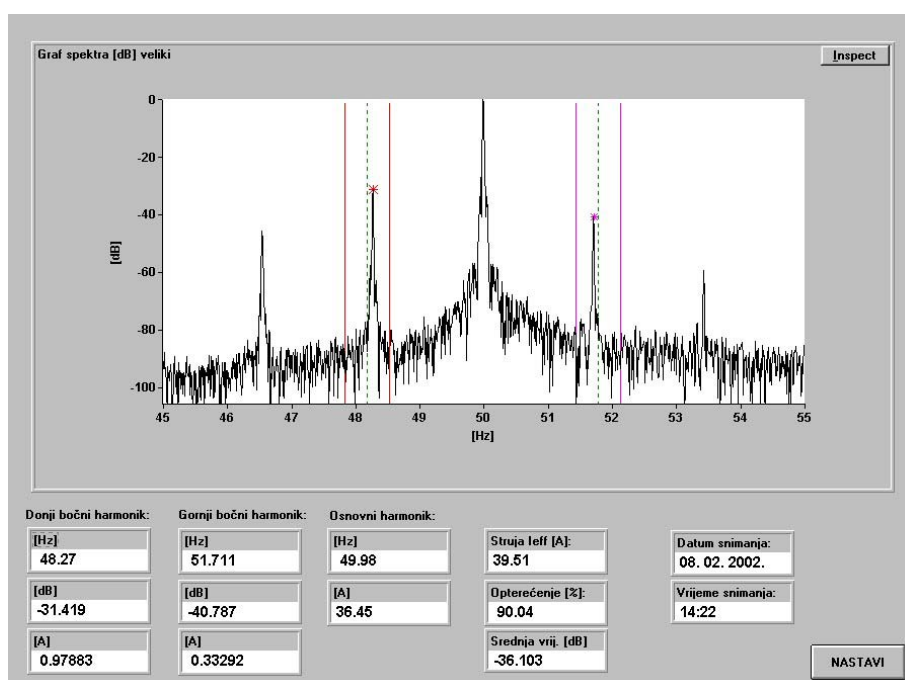
c) opterećenje 25 A



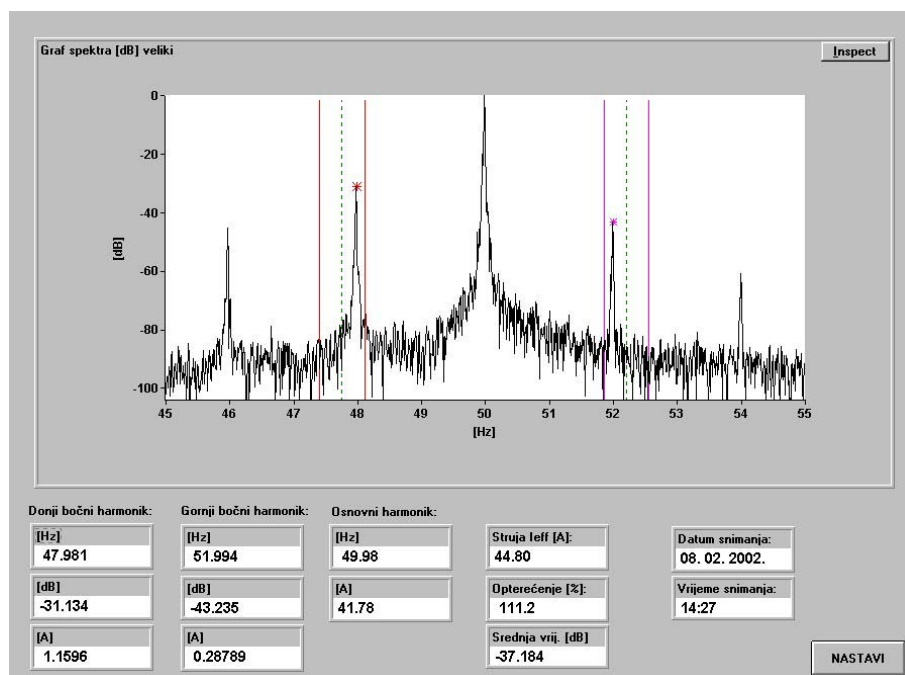
d) opterećenje 30 A



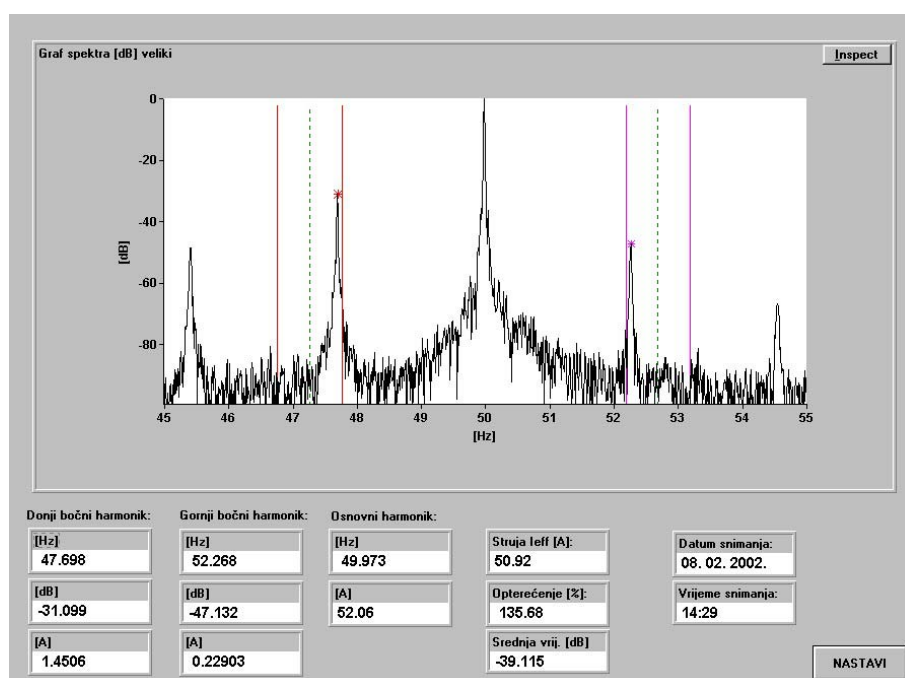
e) opterećenje 35 A



f) opterećenje 40 A

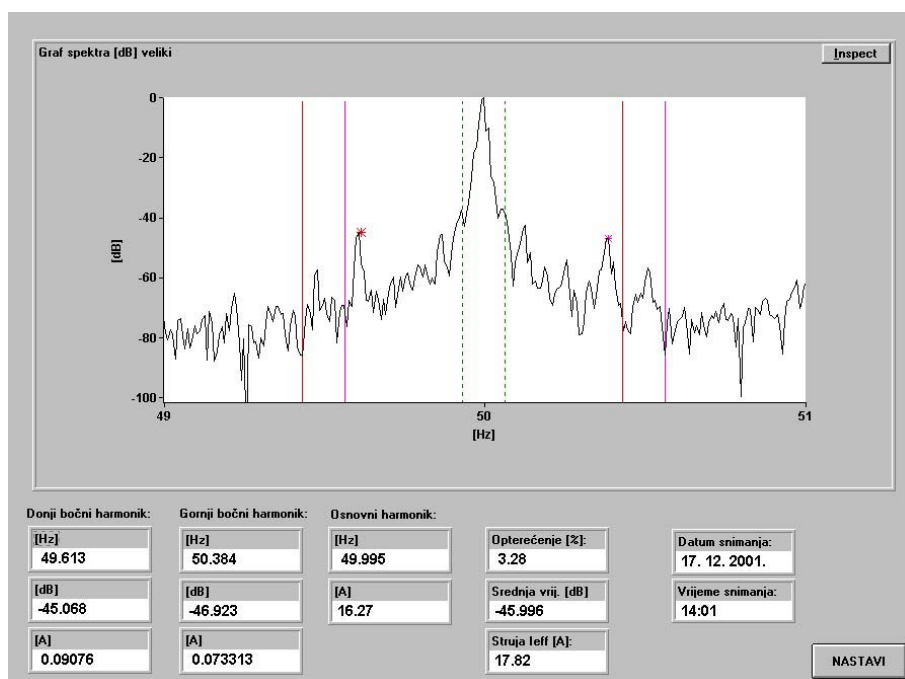


g) opterećenje 45 A

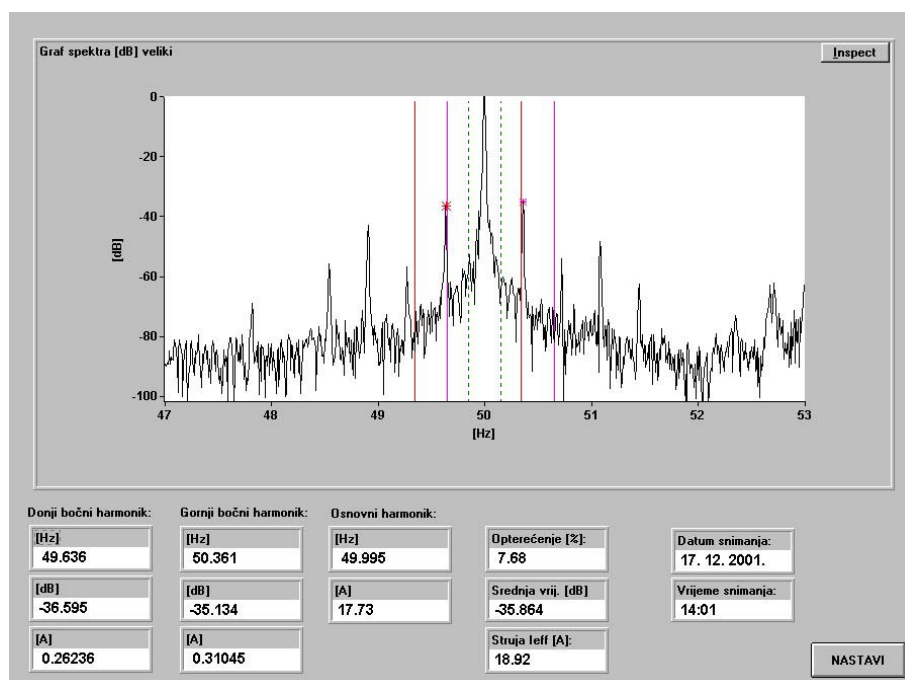


h) opterećenje 50 A

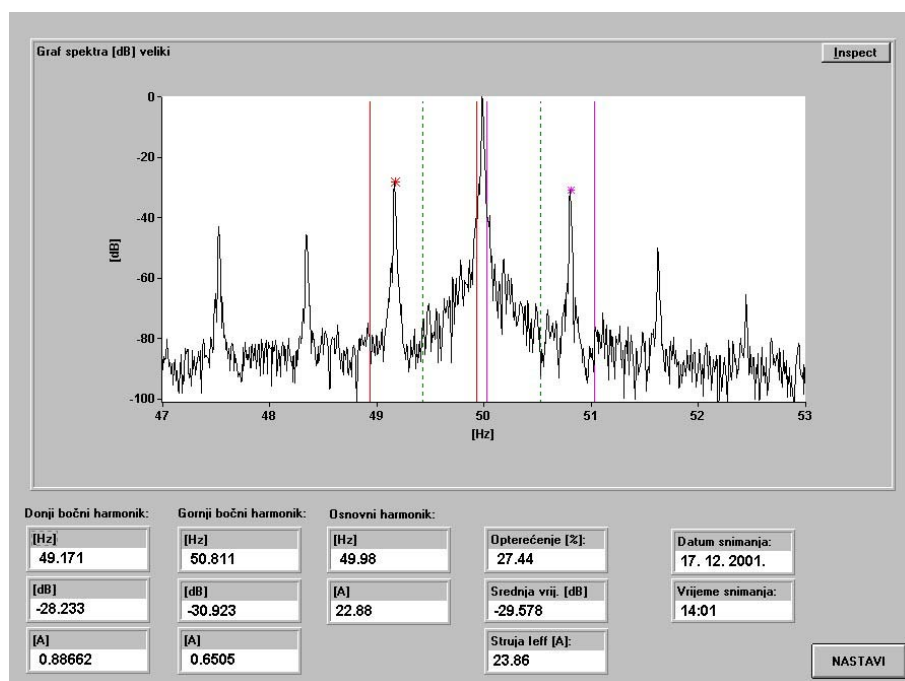
Stanje 1 – Stroj sa velikim oštećenjem kaveza



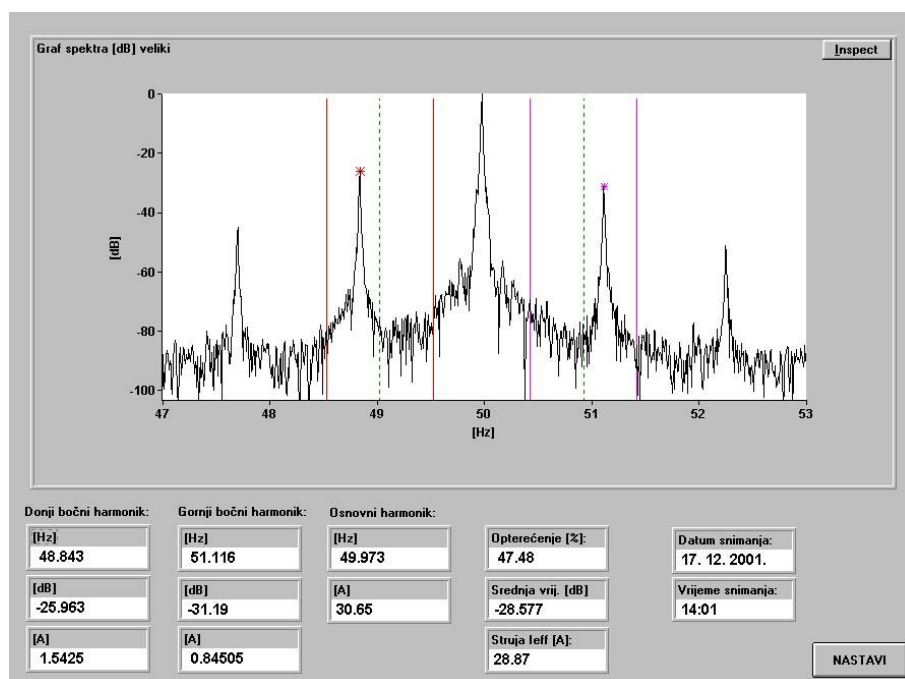
a) prazni hod



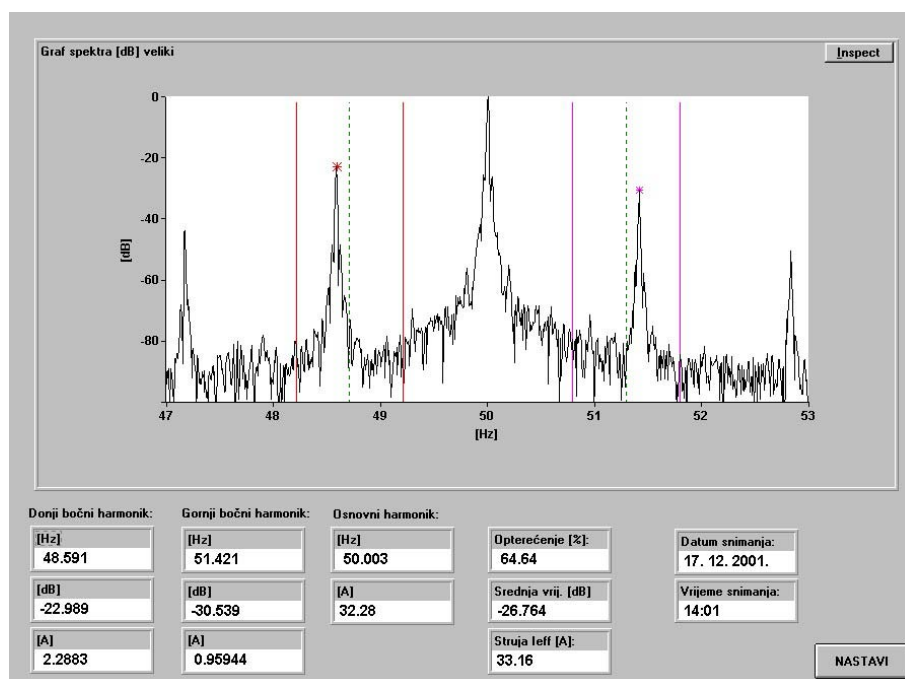
b) opterećenje 20 A



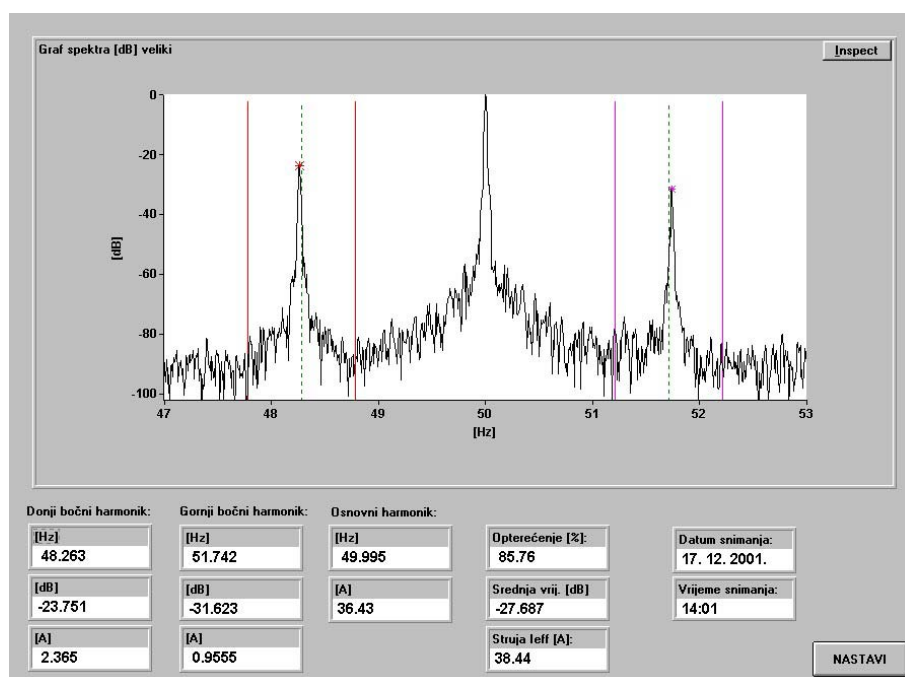
c) opterećenje 25 A



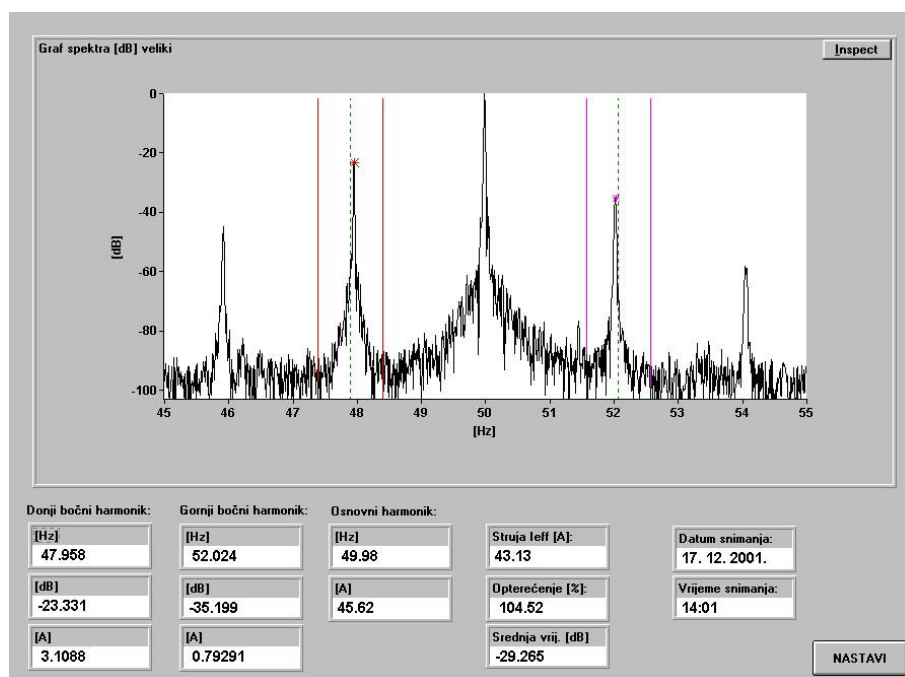
d) opterećenje 30 A



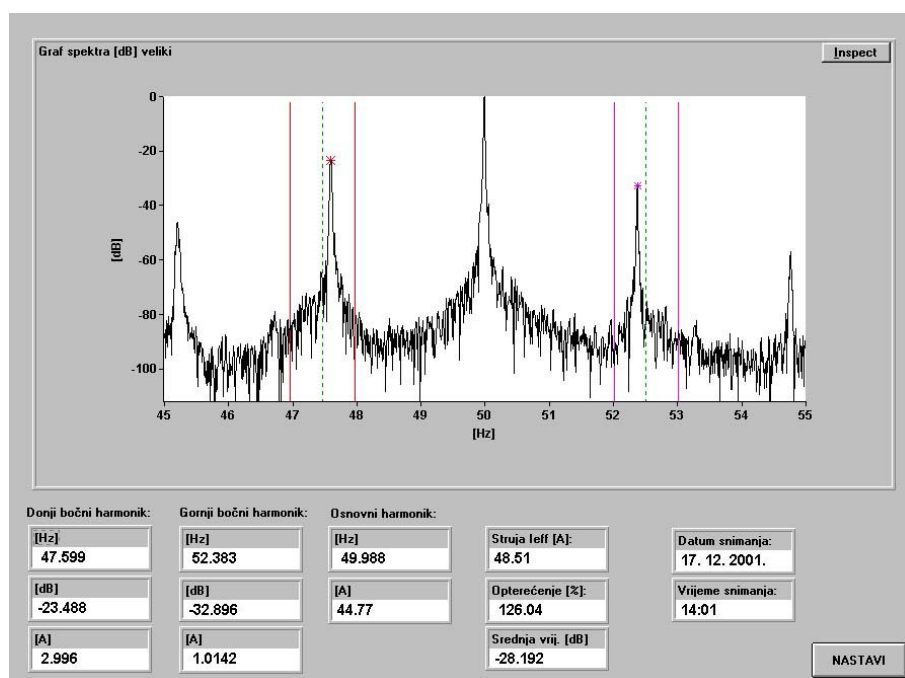
e) opterećenje 35 A



f) opterećenje 40 A



g) opterećenje 45 A

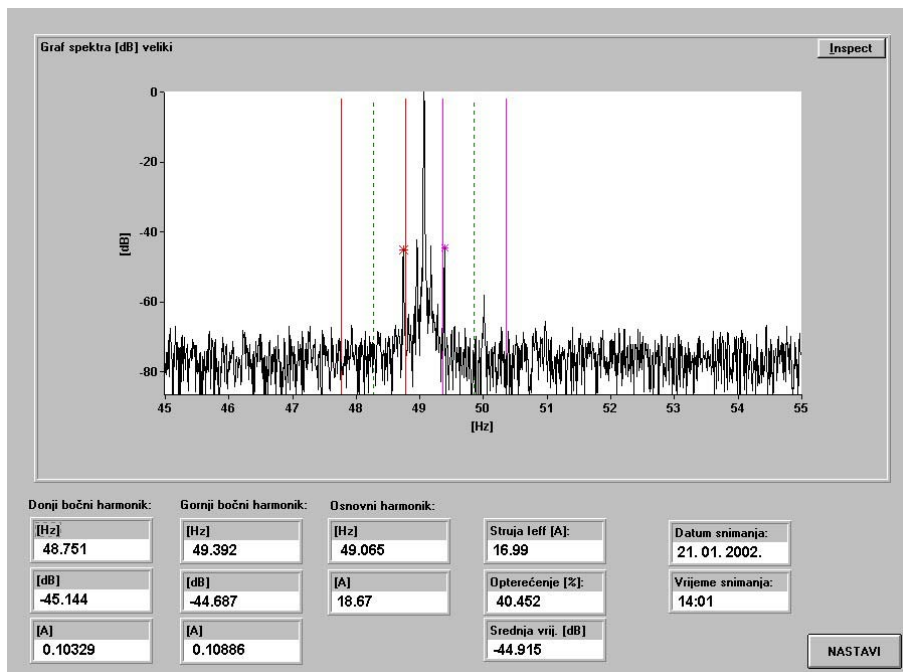


h) opterećenje 50 A

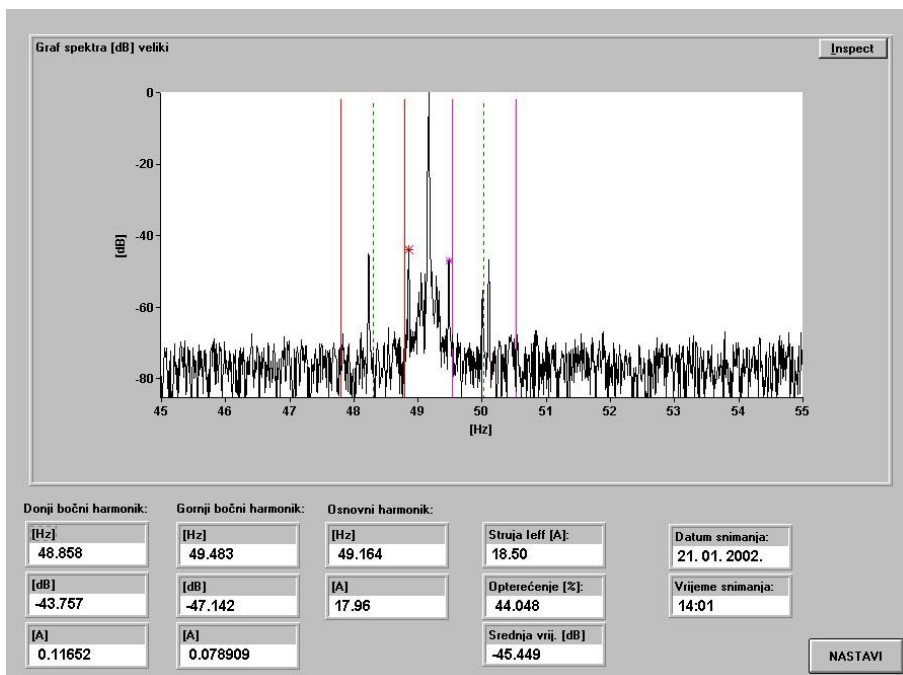
PRILOG C

Izgled spektara za različita opterećenja i različita stanja rotorskog kaveza, pri radu na frekvencijskom pretvaraču.

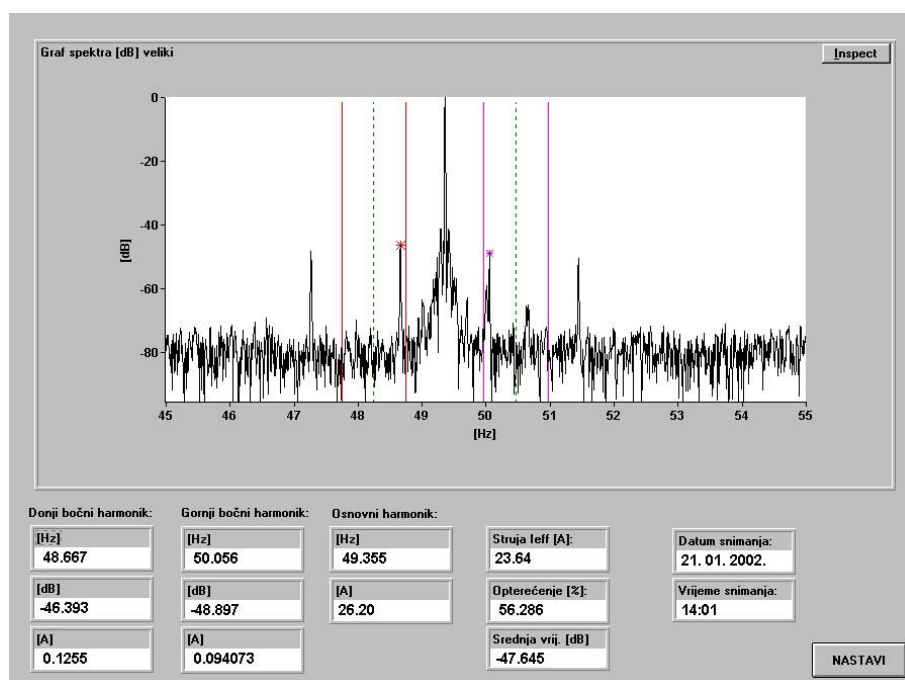
Stanje 2 – Stroj sa ispravnim kavezom



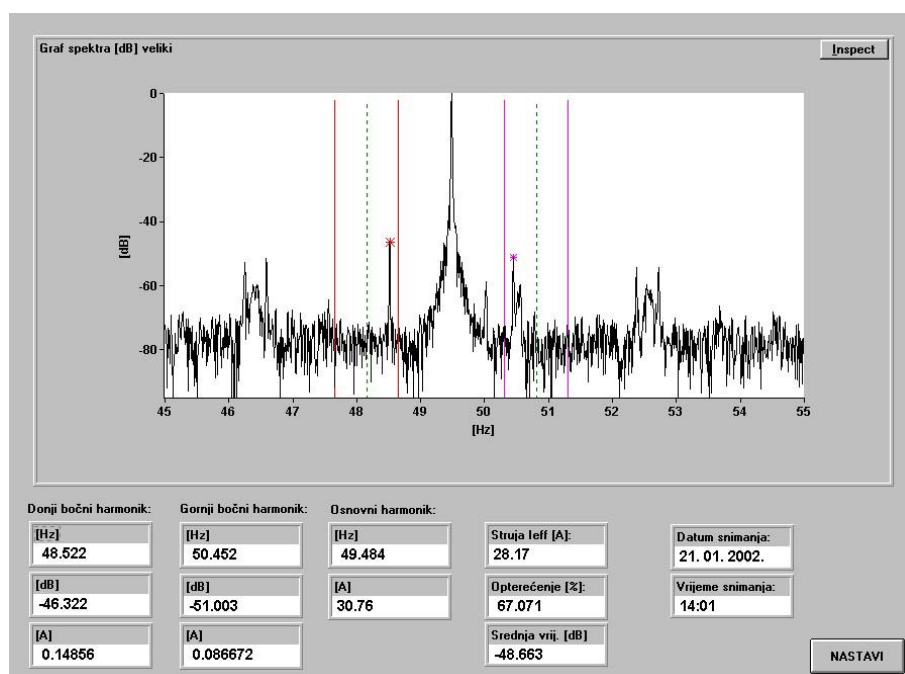
a) prazni hod



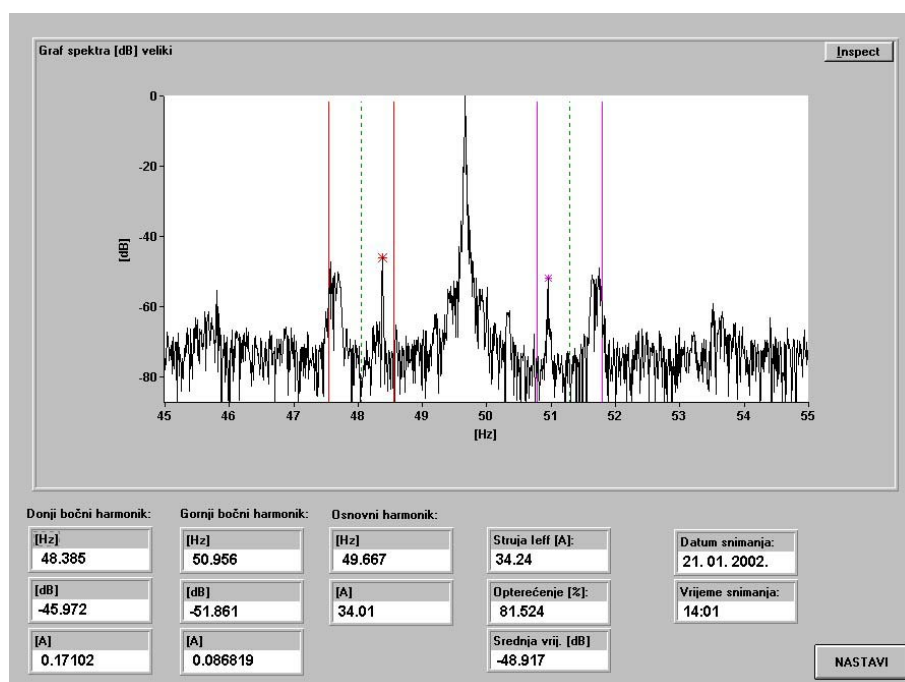
b) opterećenje 20 A



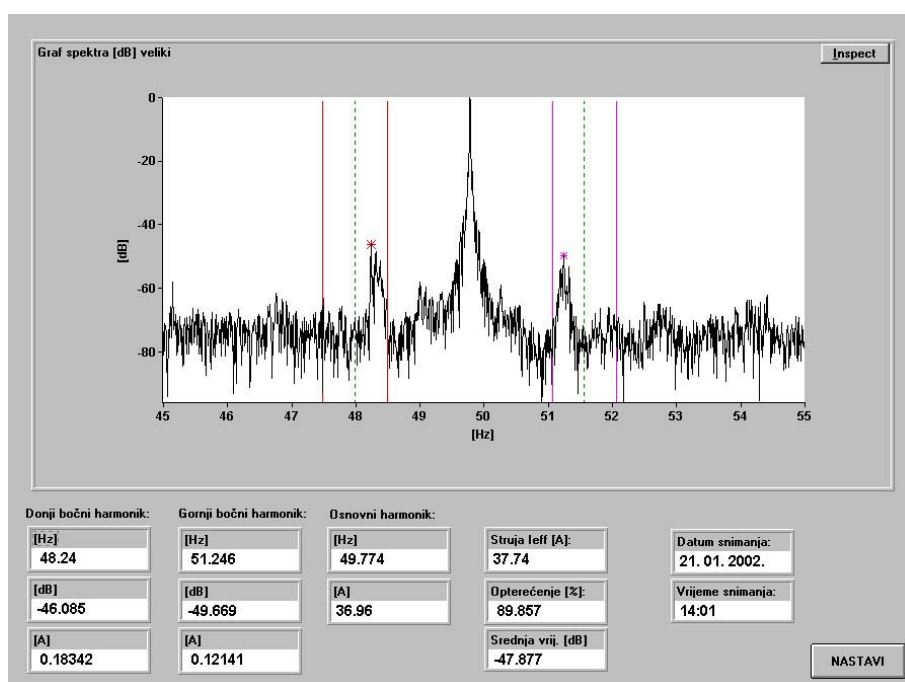
c) opterećenje 25 A



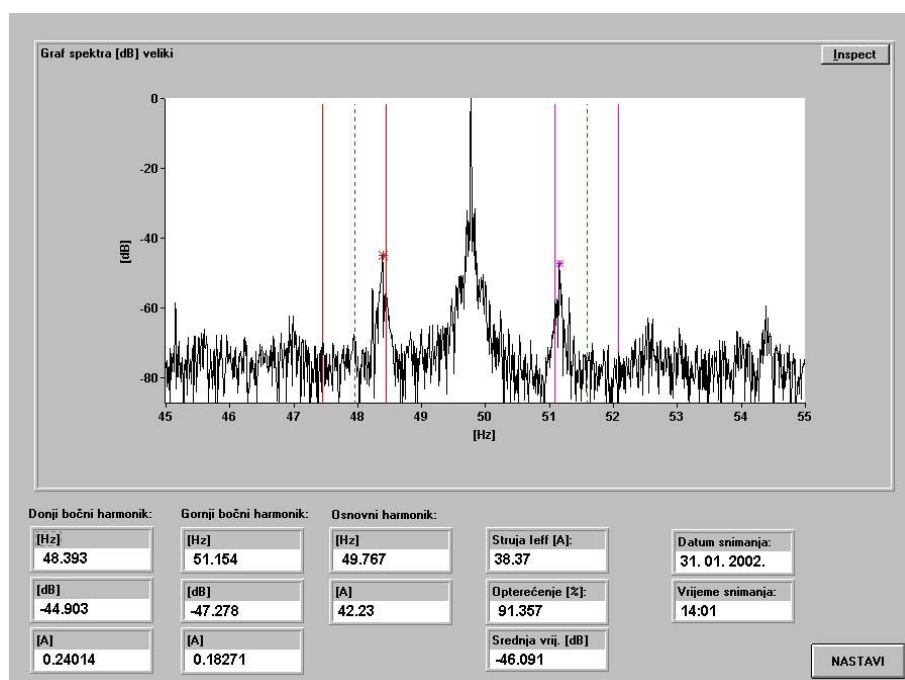
d) opterećenje 30 A



e) opterećenje 35 A

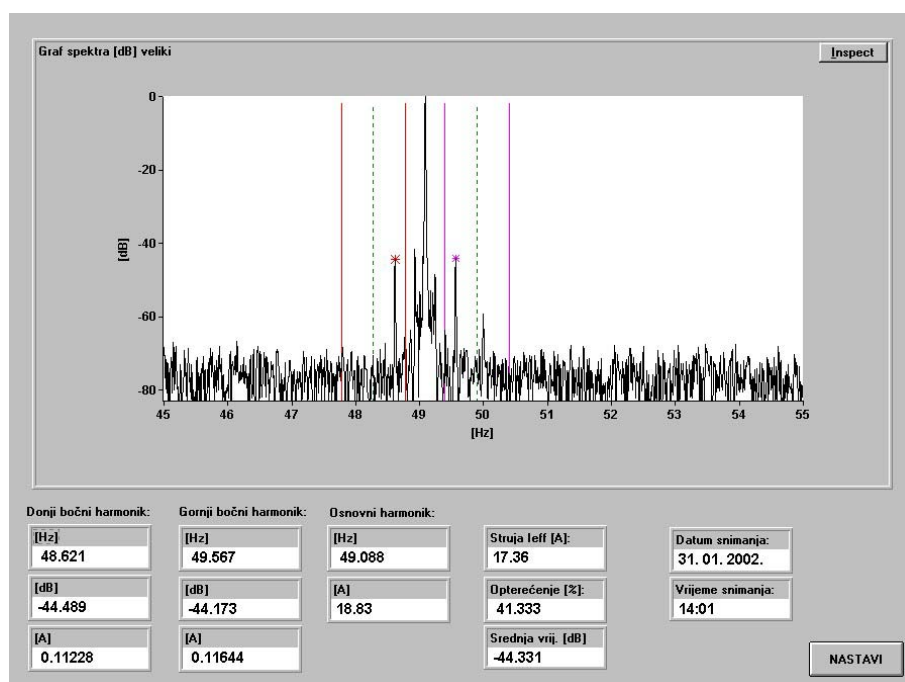


f) opterećenje 40 A

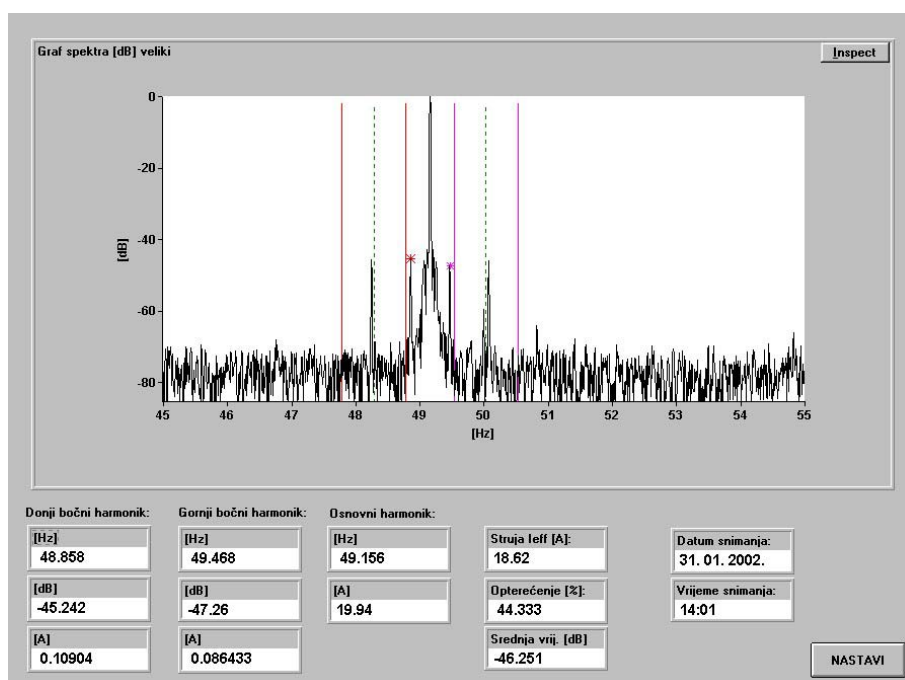


g) opterećenje 45A

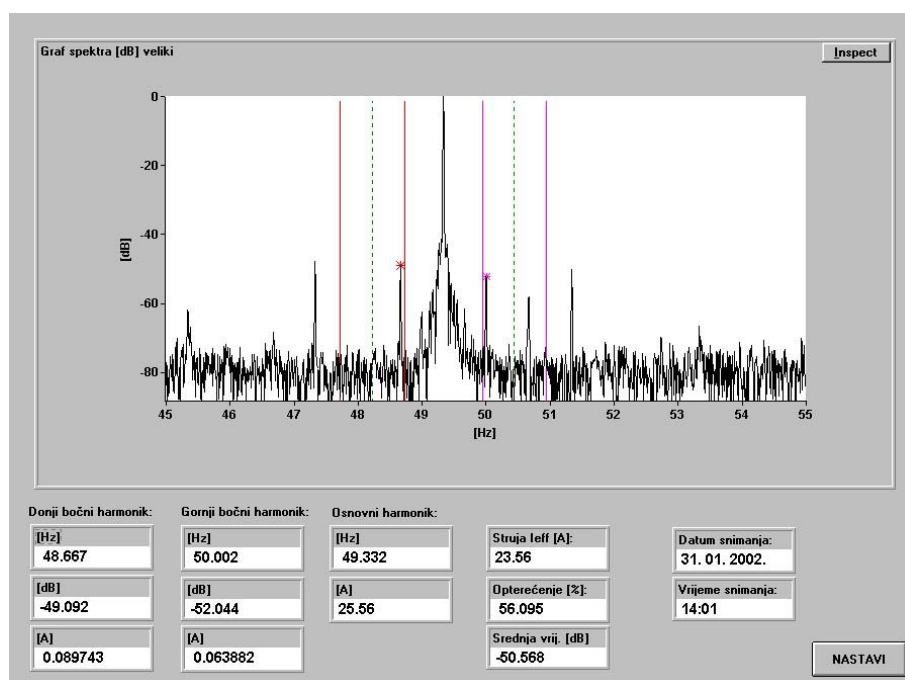
Stanje 3 – Stroj sa početnim oštećenjem jednog štapa



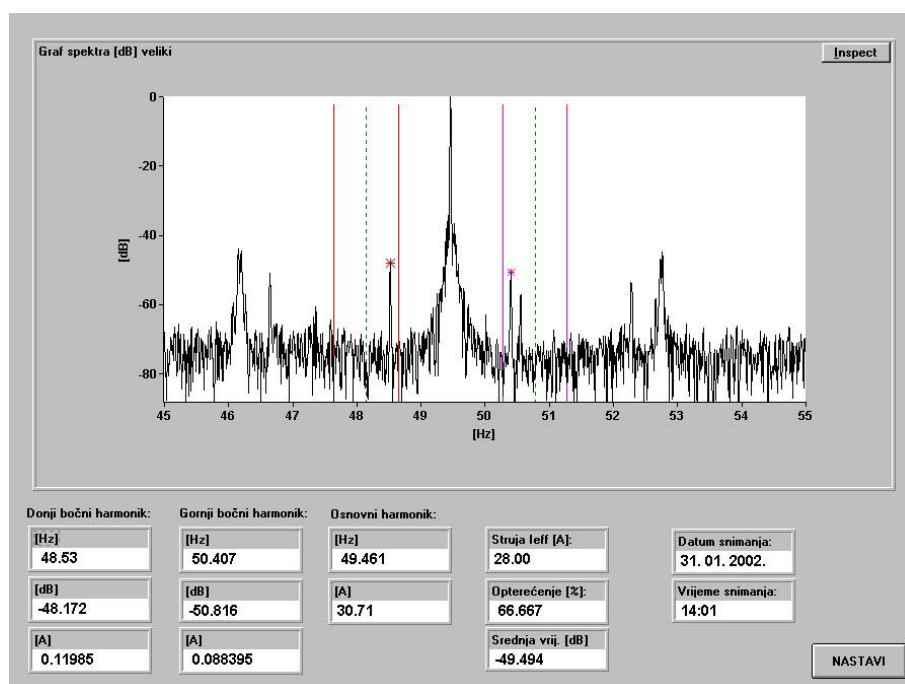
a) prazni hod



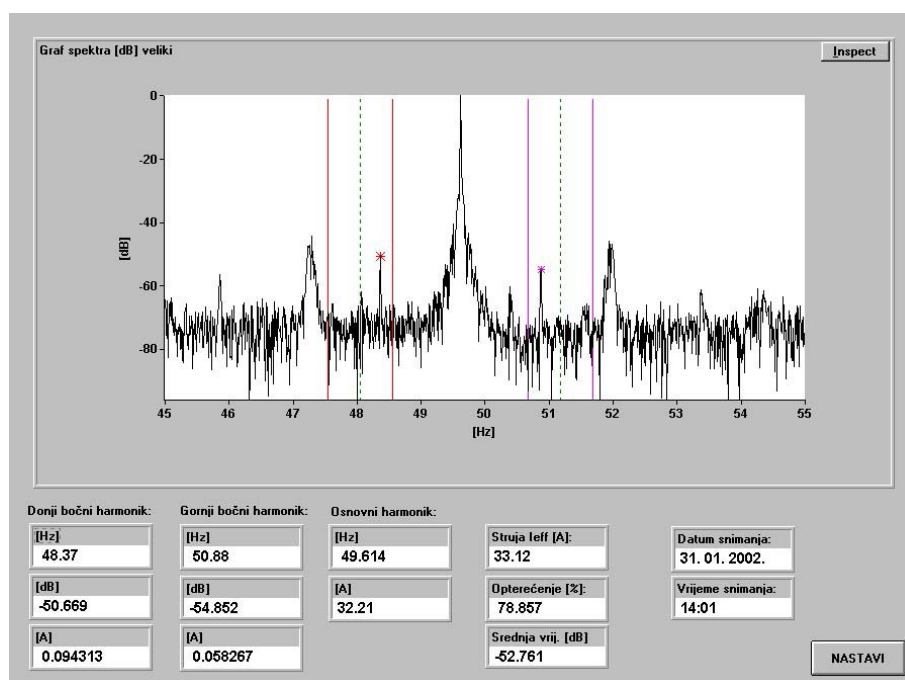
b) opterećenje 20 A



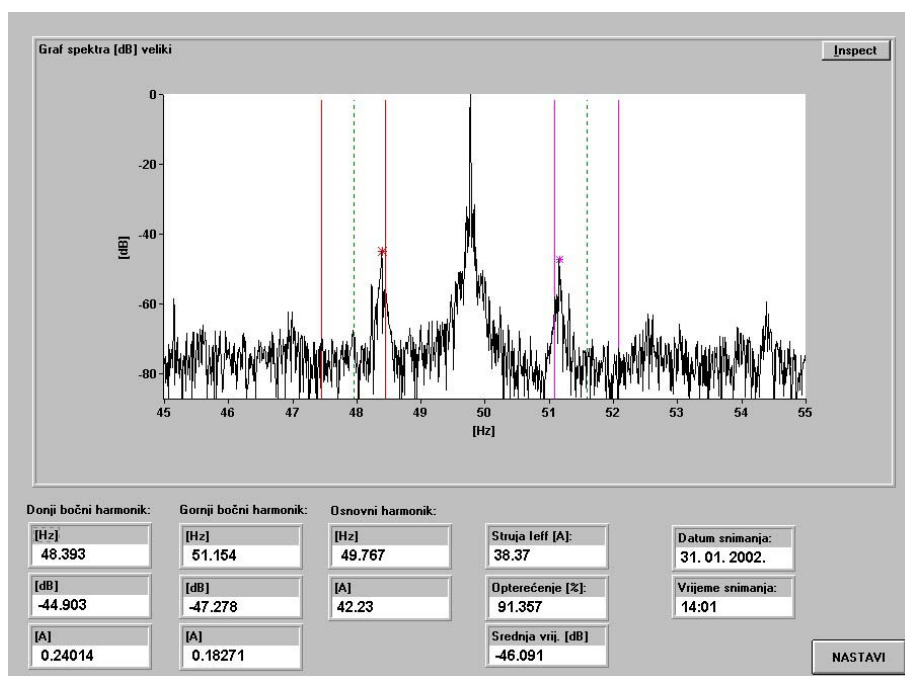
c) opterećenje 25 A



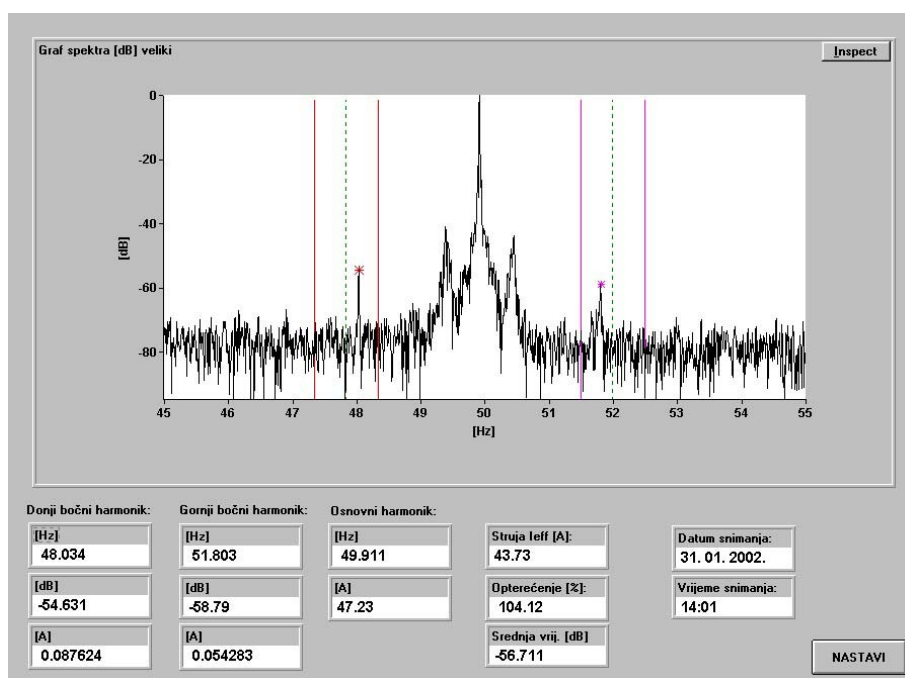
d) opterećenje 30 A



e) opterećenje 35 A

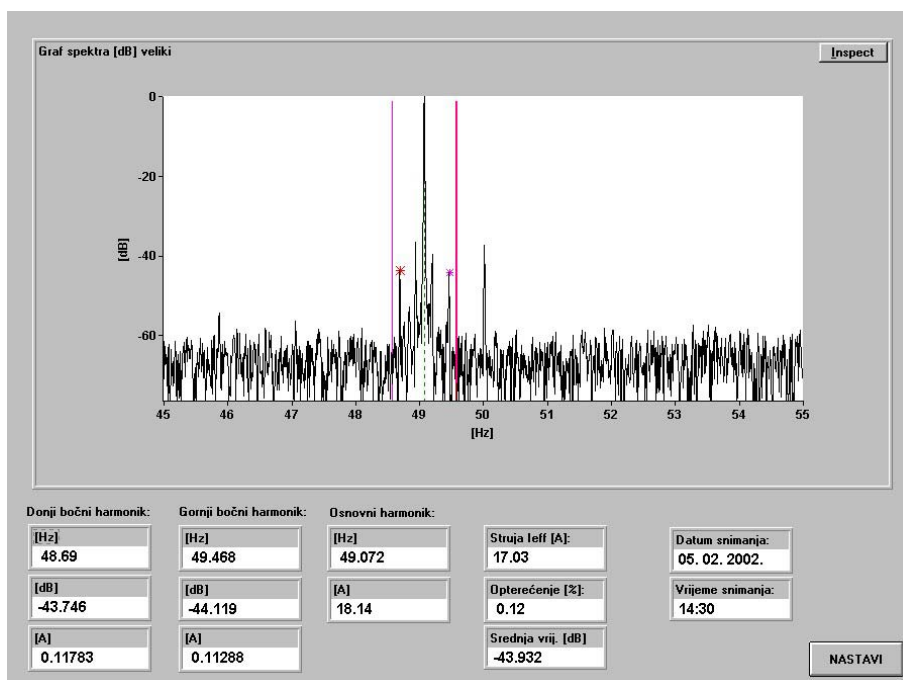


f) opterećenje 40 A

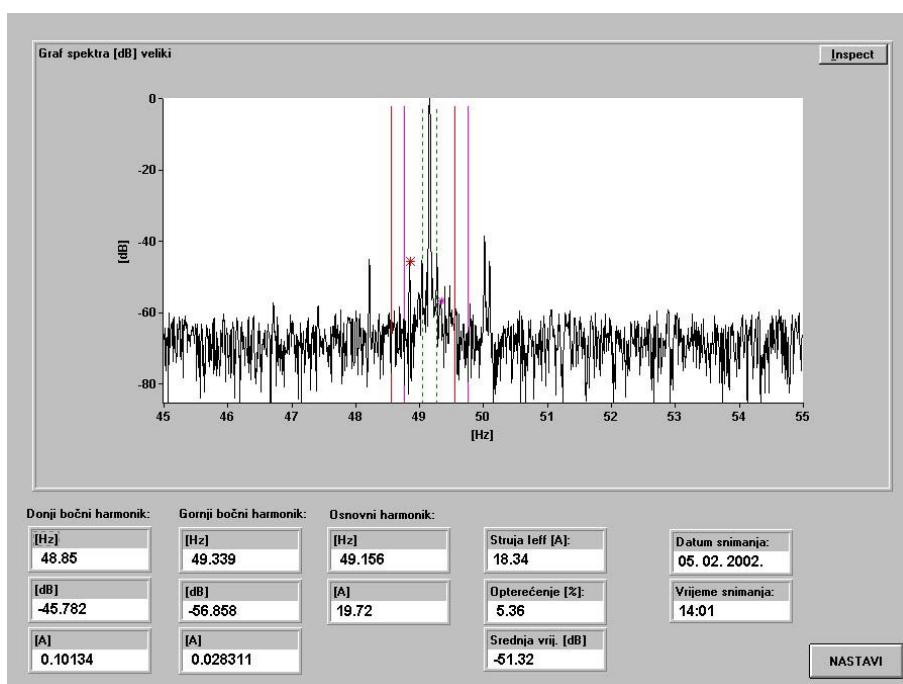


g) opterećenje 45 A

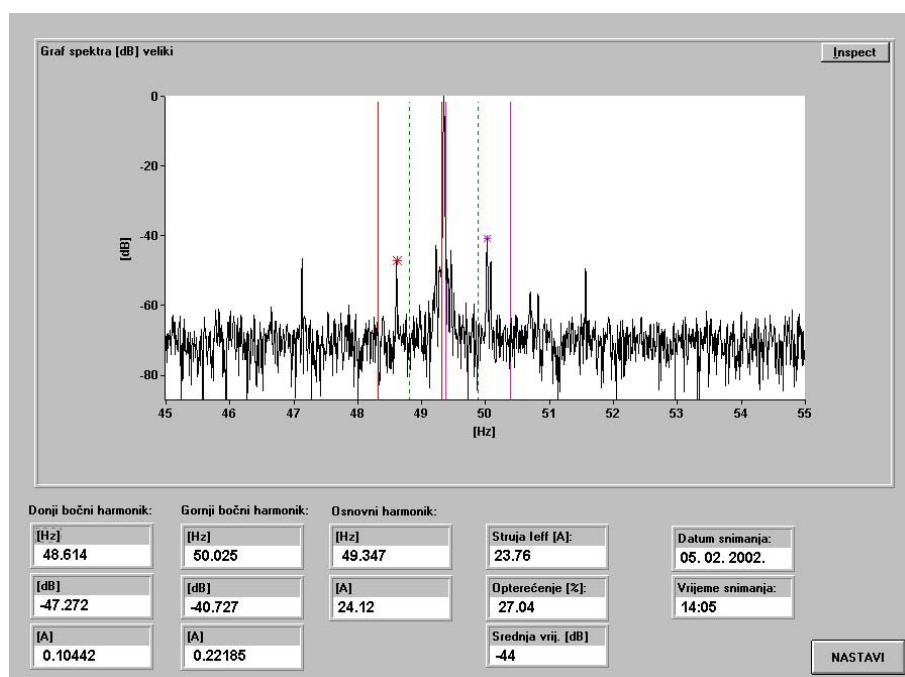
Stanje 4 – Stroj sa jednim prerezanim štapom



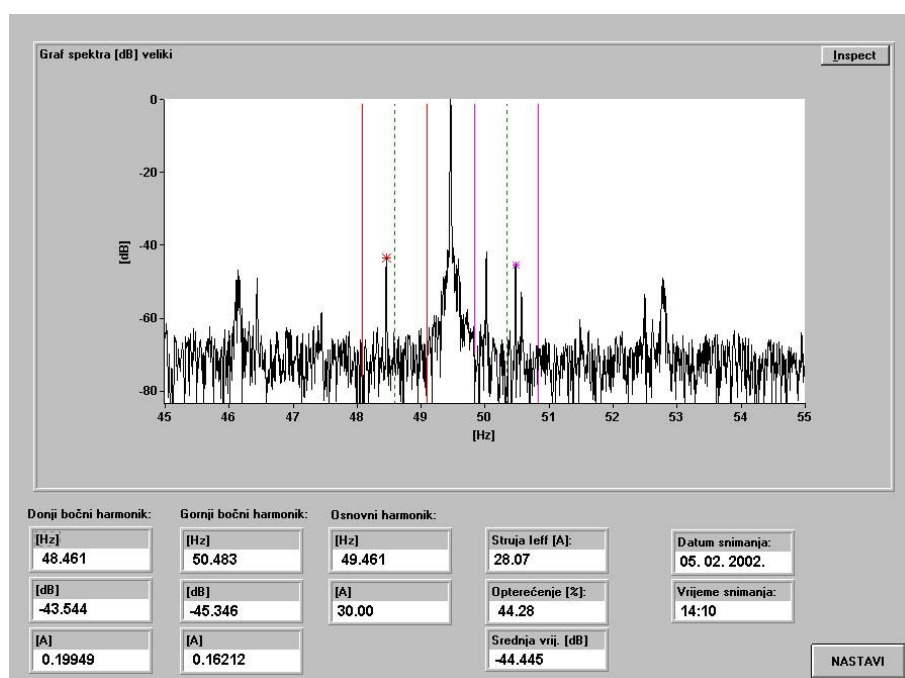
a) prazni hod



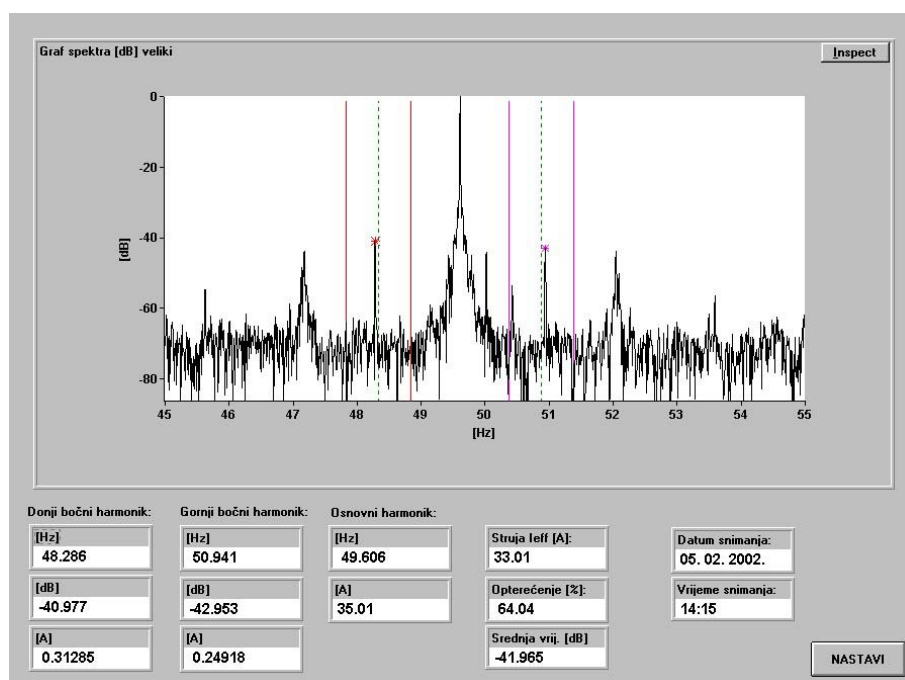
b) opterećenje 20 A



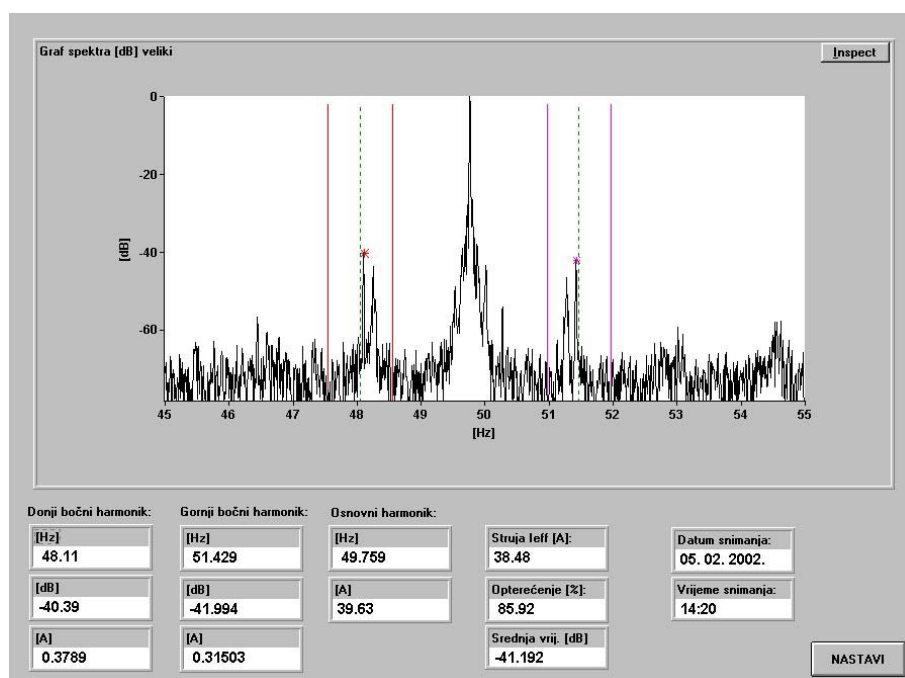
c) opterećenje 25 A



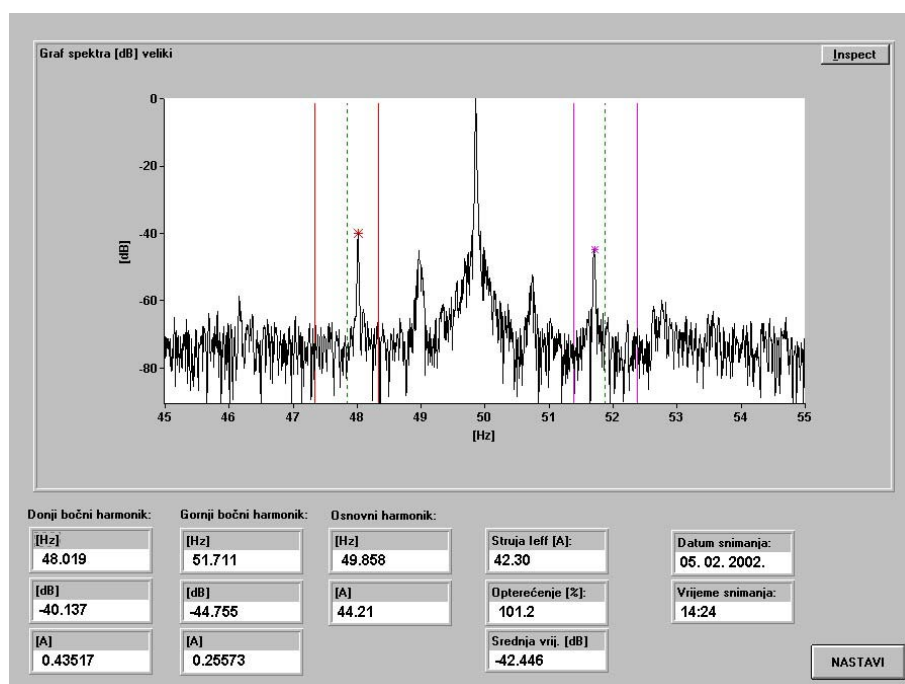
d) opterećenje 30 A



e) opterećenje 35 A

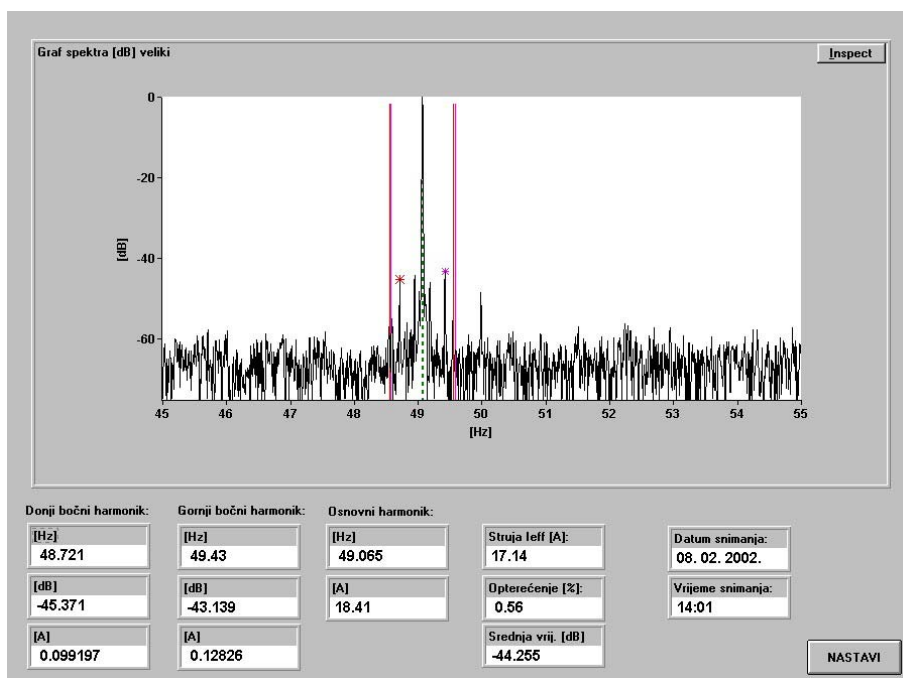


f) opterećenje 40 A

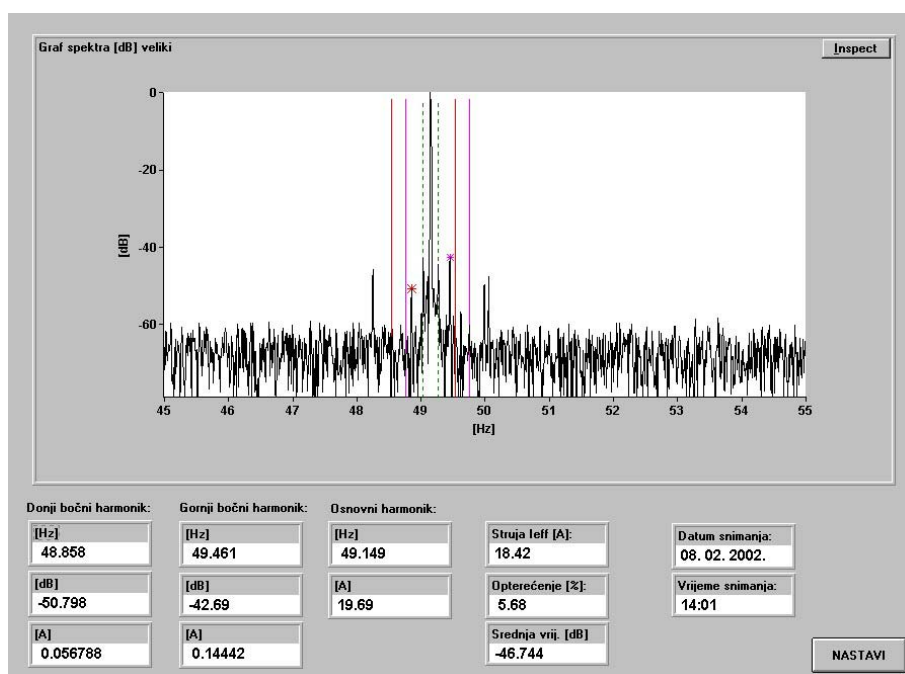


g) opterećenje 45 A

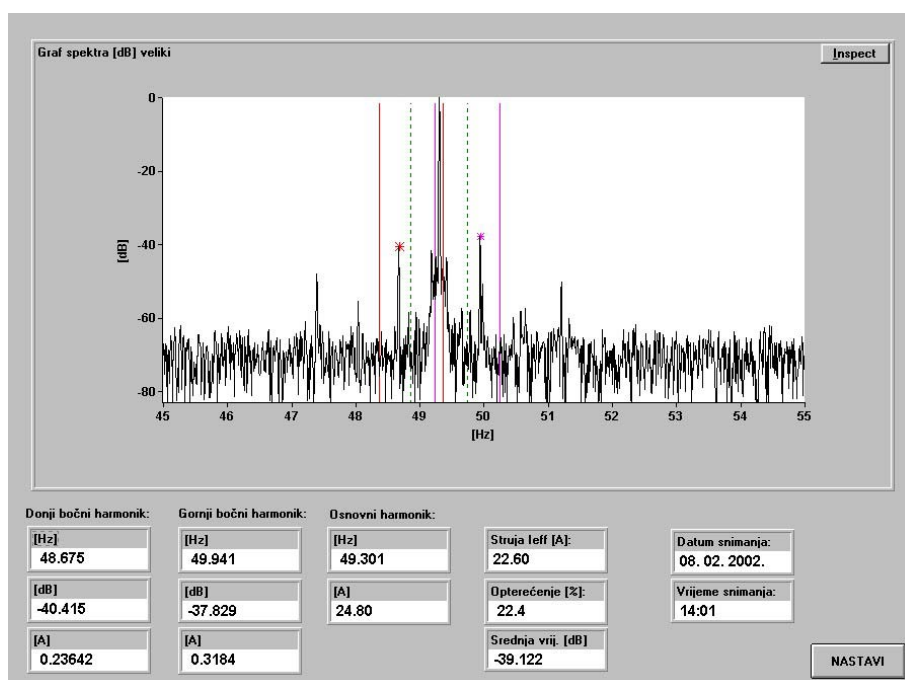
Stanje 5 – Stroj sa dva prerezana štapa



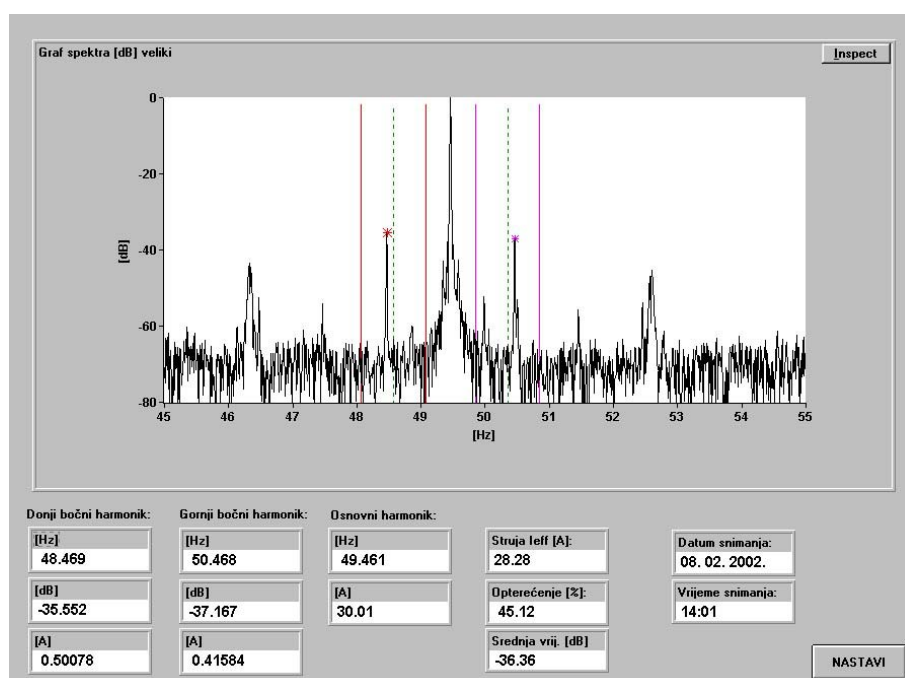
a) prazni hod



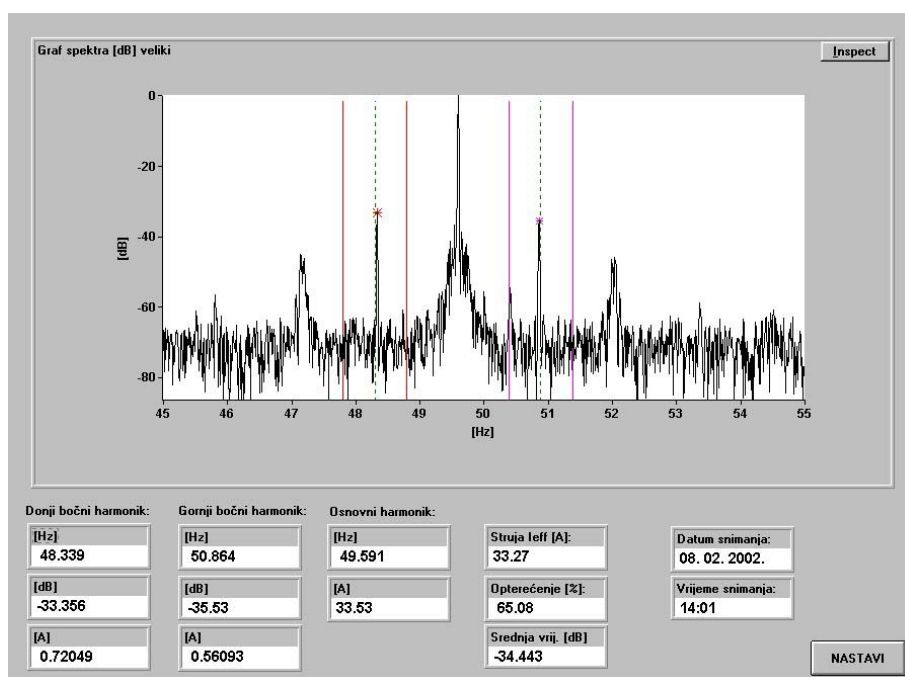
b) opterećenje 20 A



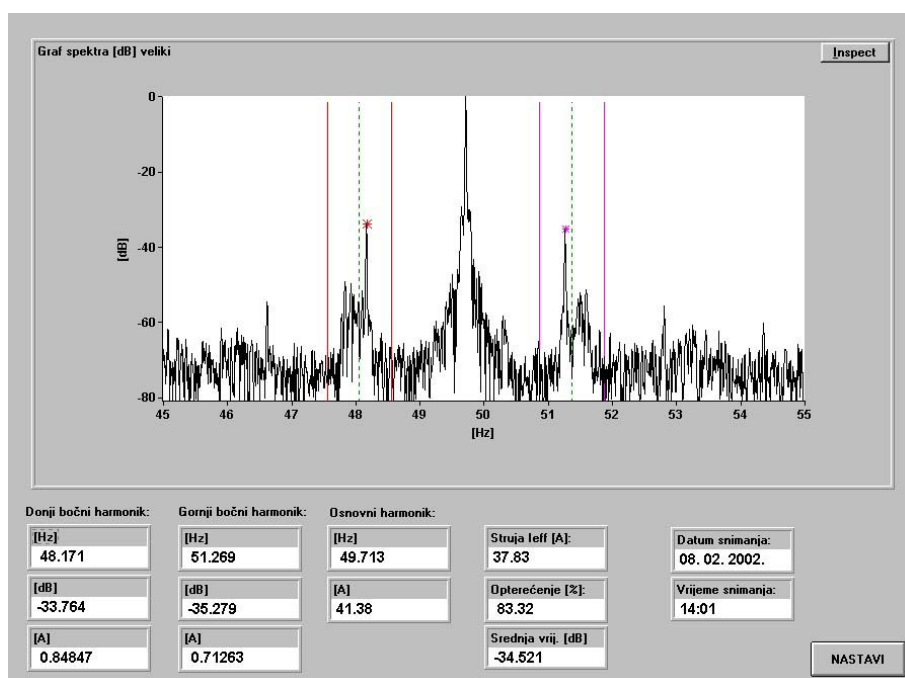
c) opterećenje 25 A



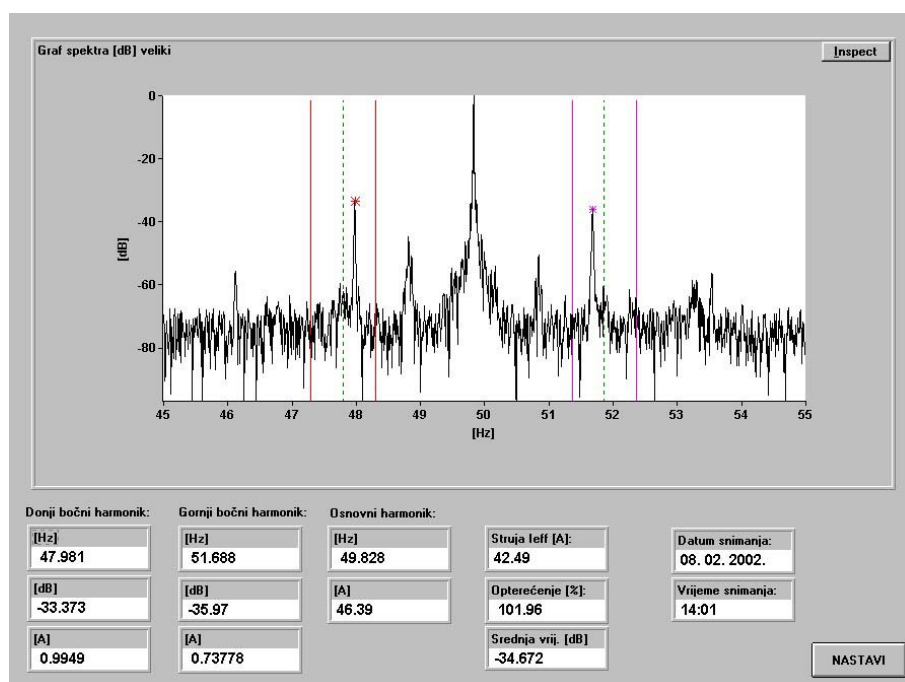
d) opterećenje 30 A



e) opterećenje 35 A



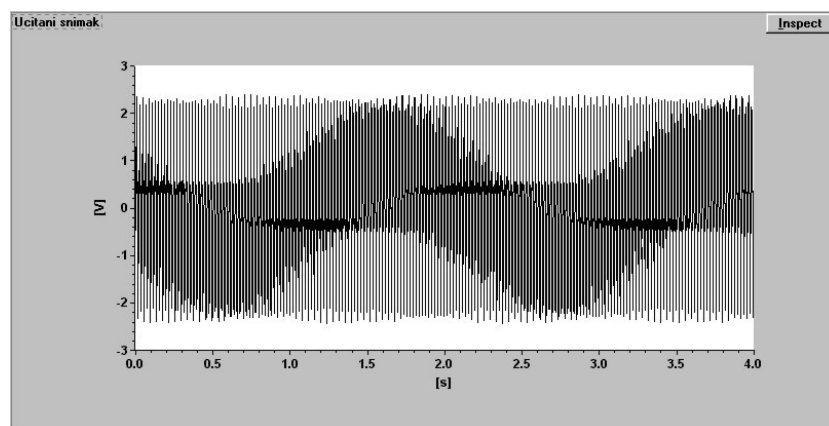
f) opterećenje 40 A



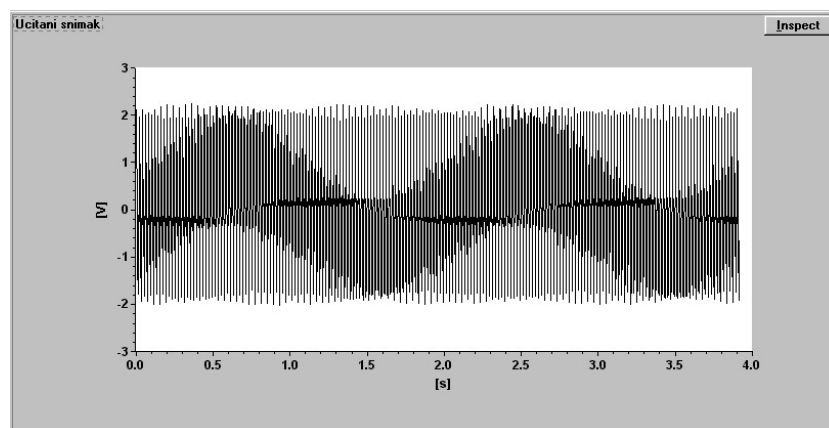
g) opterećenje 45 A

PRILOG D

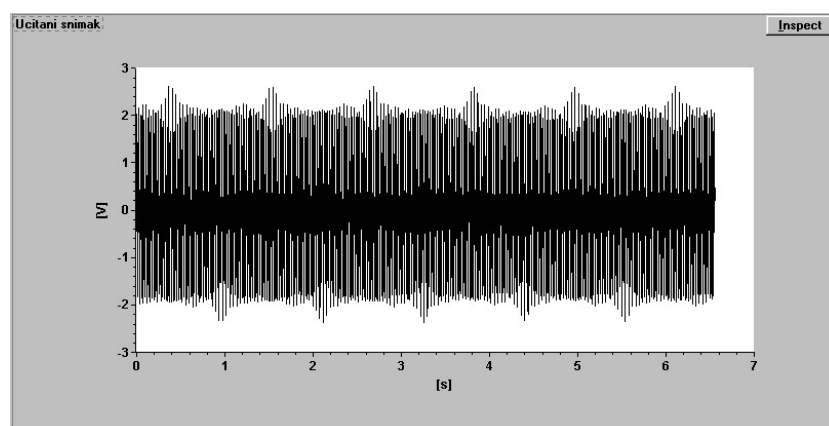
Napon ispitnog svitka za različita stanja stroja pri nazivnom opterećenju.



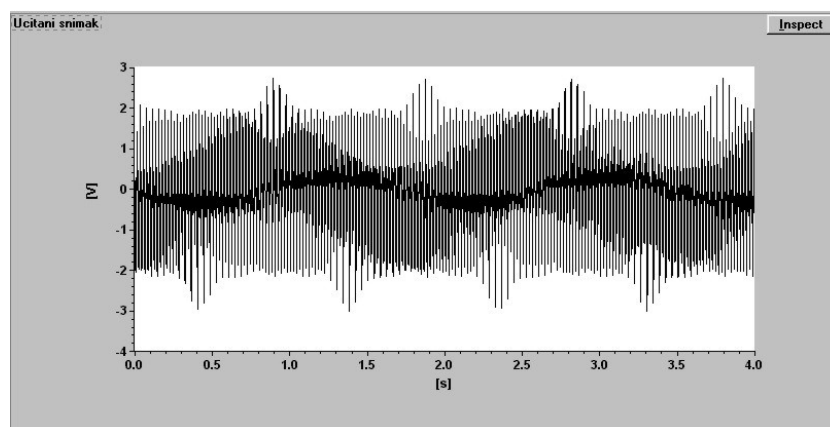
Stanje 2 – Stroj sa ispravnim kavezom



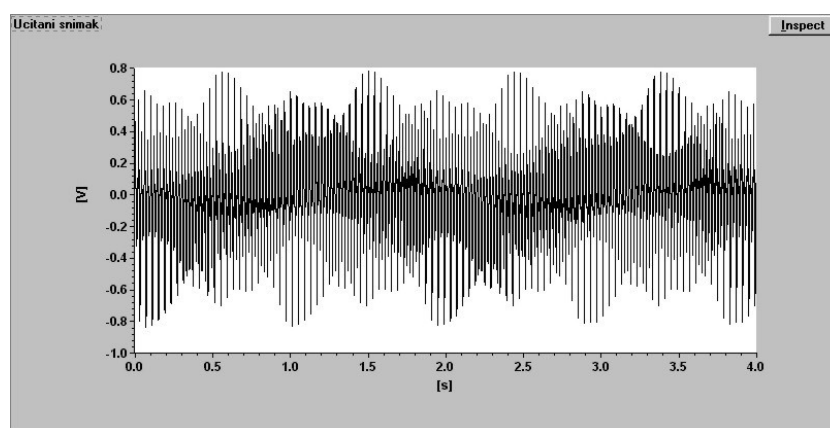
Stanje 3 – Stroj sa početnim oštećenjem jednog štapa



Stanje 4 – Stroj sa jednim prerezanim štapom

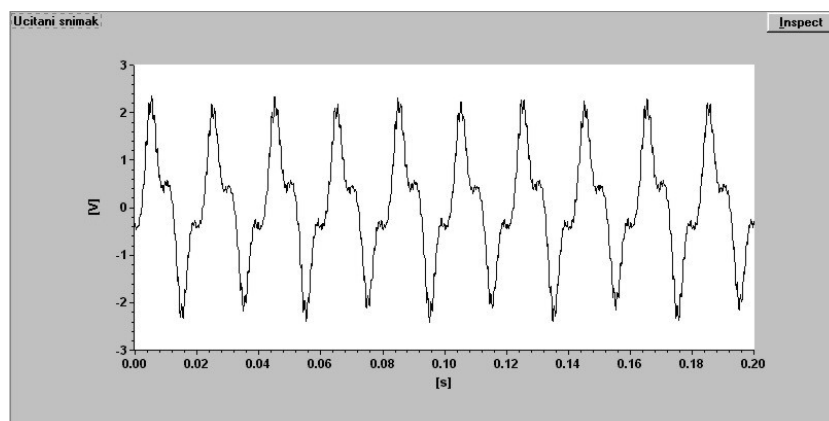


Stanje 5 – Stroj sa dva prerezana štapa

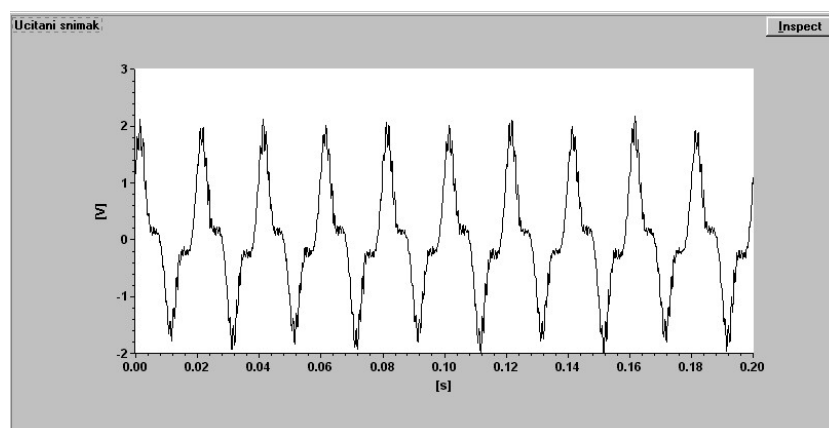


Stanje 1 – Stroj sa velikim oštećenjem kaveza

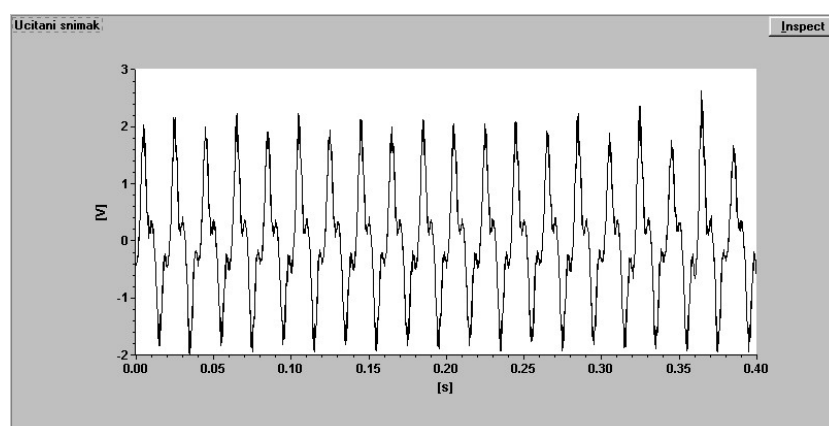
Detalj napona ispitnog svitka za različita stanja stroja pri nazivnom opterećenju.



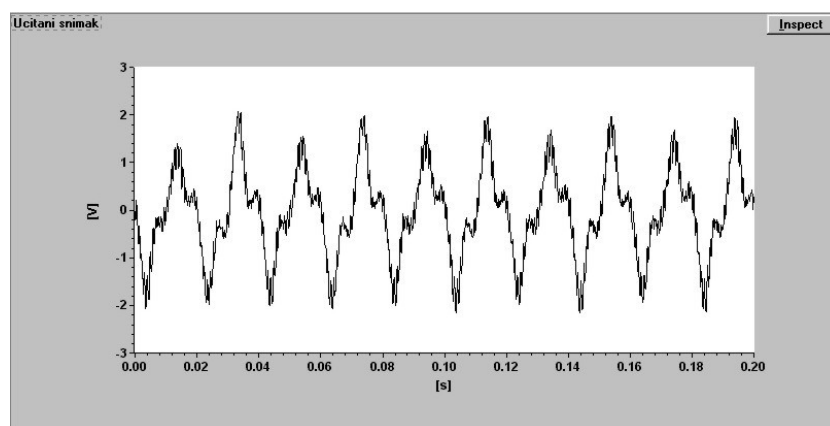
Stanje 2 – Stroj sa ispravnim kavezom



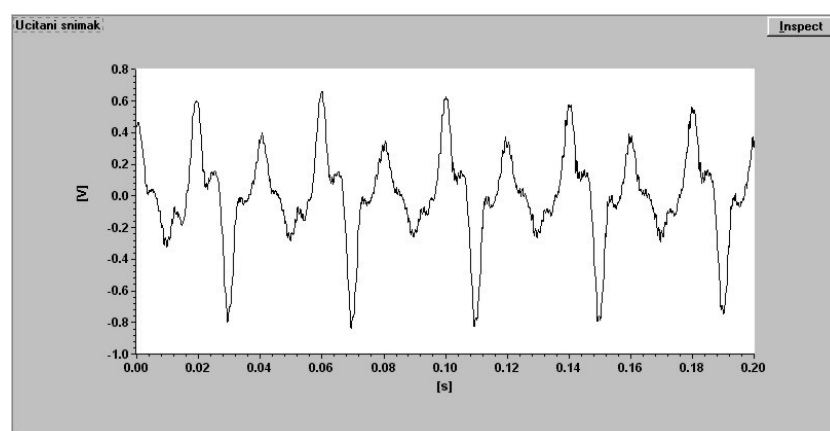
Stanje 3 – Stroj sa početnim oštećenjem jednog štapa



Stanje 4 – Stroj sa jednim prerezanim štapom



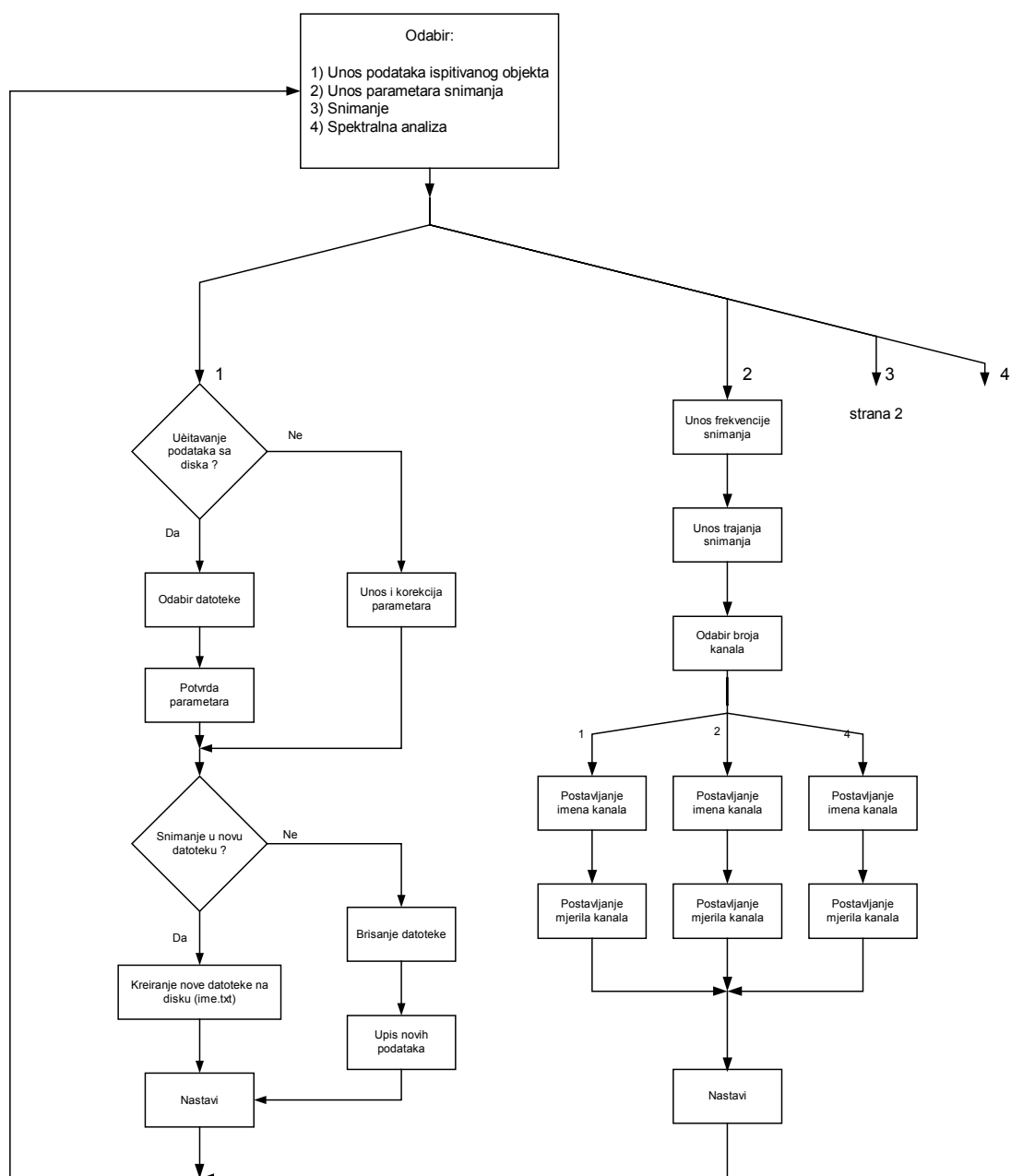
Stanje 5 – Stroj sa dva prerezana štapa

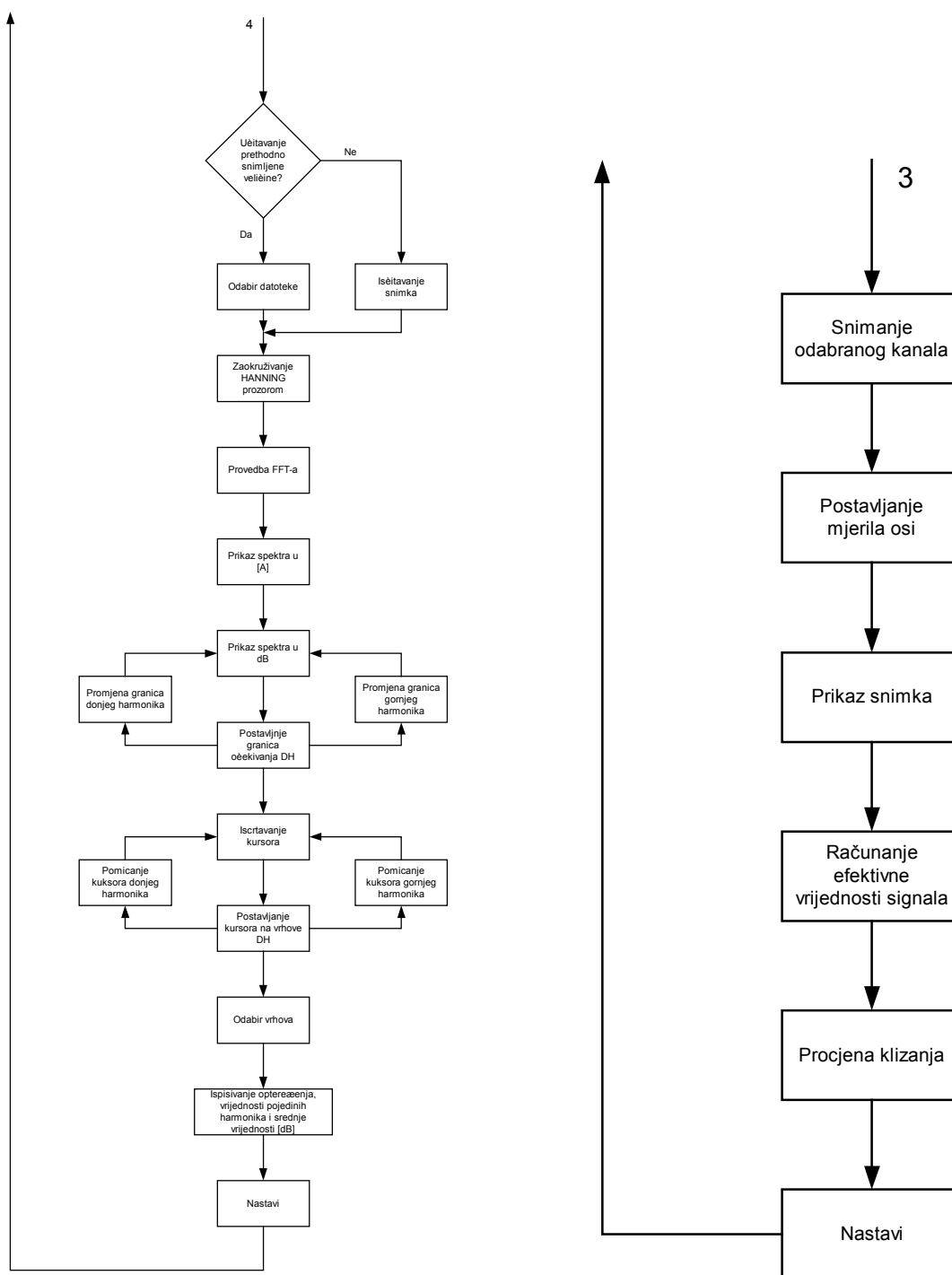


Stanje 1 – Stroj sa velikim oštećenjem kaveza

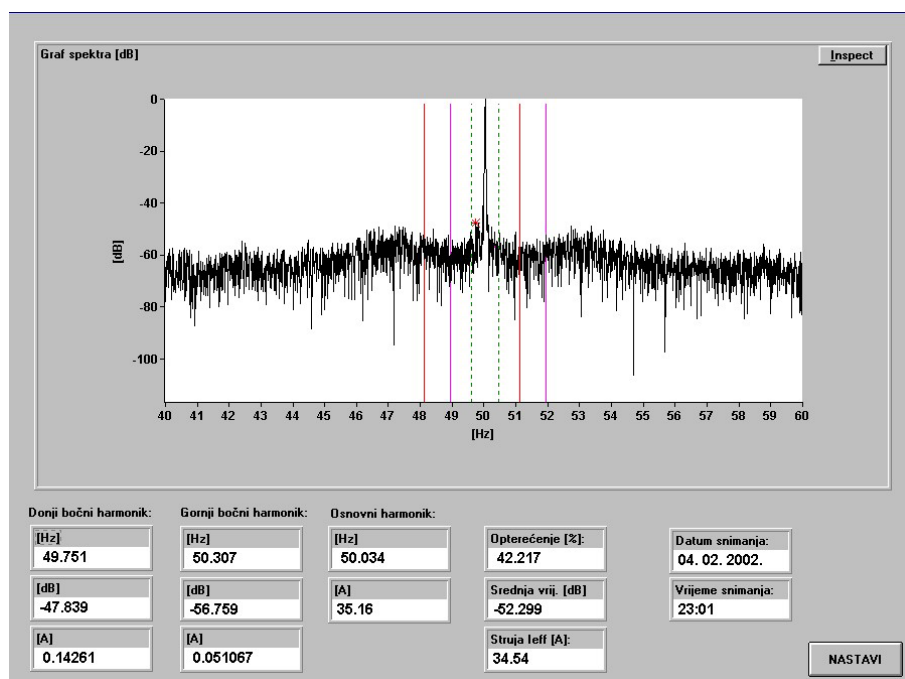
PRILOG E

Dijagram toka aplikacije za spektralnu analizu statorske struje.

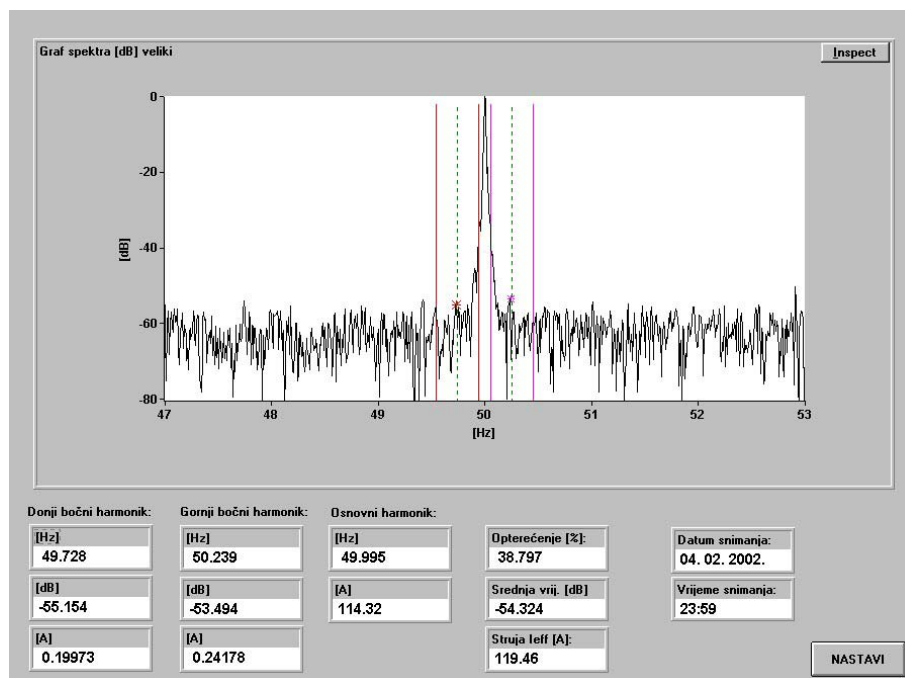




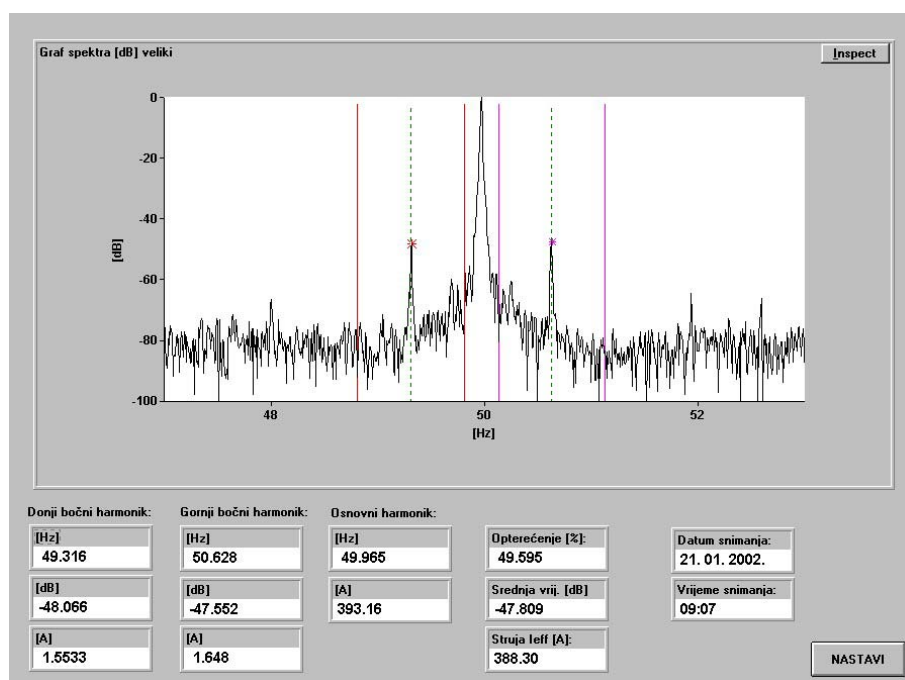
PRILOG F



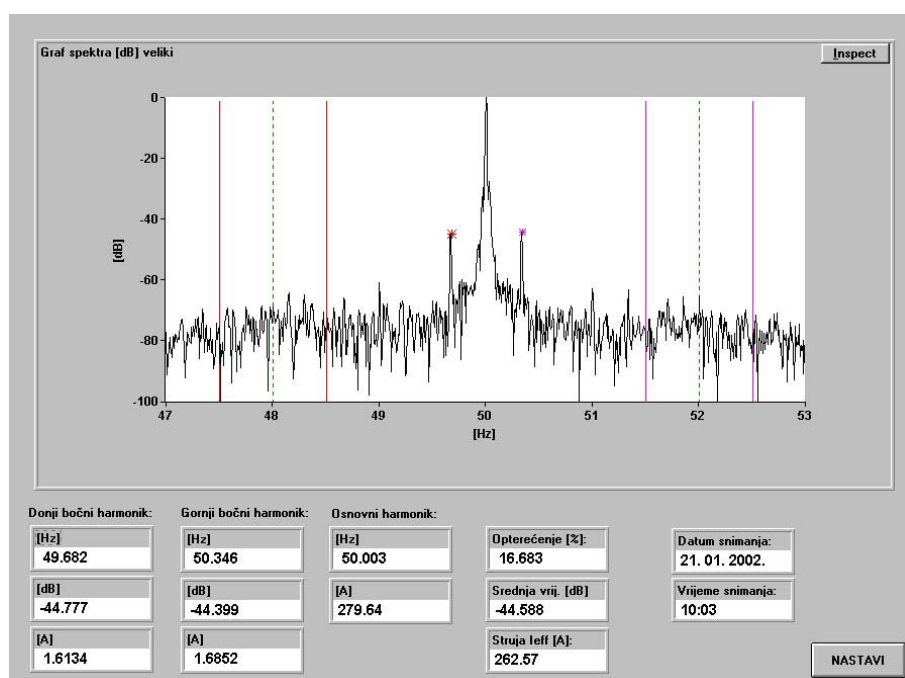
Spektar struje stroja 6 kV, 500 kW



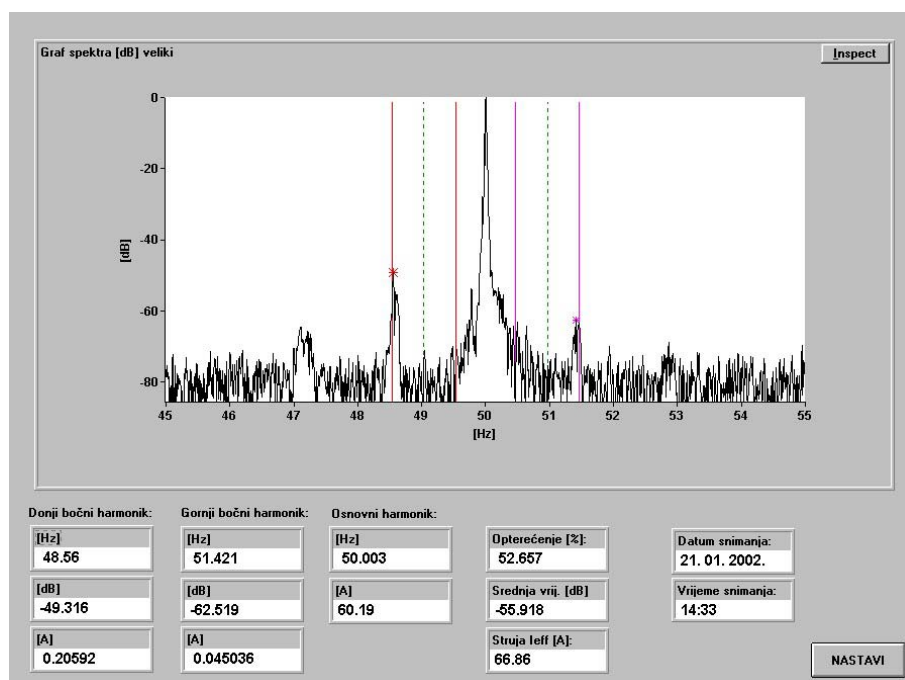
Spektar struje stroja 6 kV, 1.9 MW



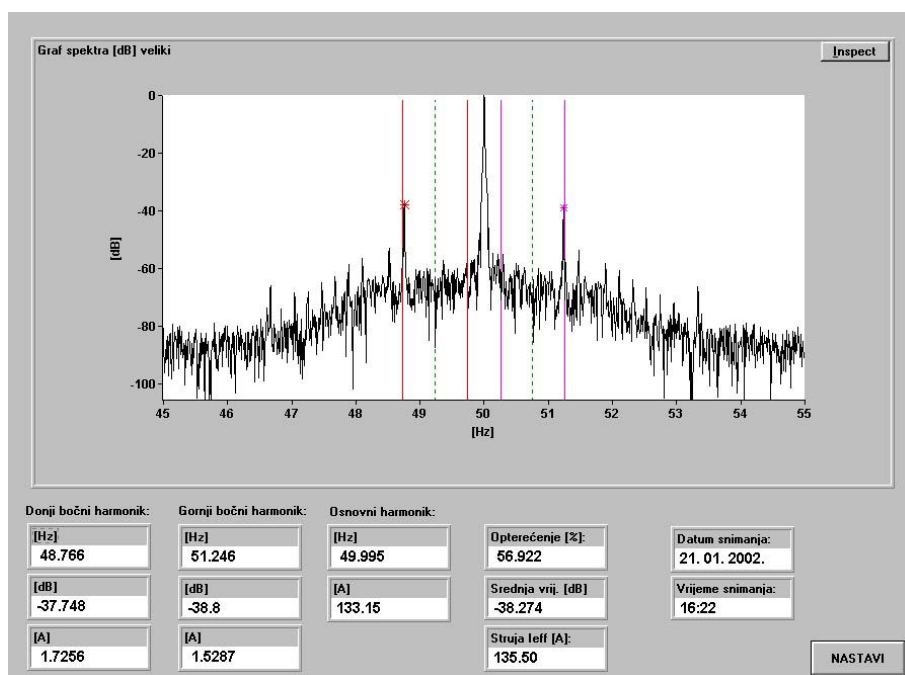
Spektar struje stroja 400 V, 355 kW



Spektar struje stroja 380 V, 355 kW



Spektar struje stroja 400 V, 60 kW



Spektar struje stroja 400 V, 110 kW

PRILOG G

Izvjješće korištenjem programskog paketa Motormonitor.

naziv motora	: 2501	naz.snaga	: 500	KW
mjesto	: JANAF	naz.napon (V)	: 6000	
svrha	:	naz.struja (A)	: 58	
pogon	:	korisnost	: 95%	
ser. broj	:	cos fi	: .88	
tip	: 4AZsh 905-4	struja pr.hoda	: 15.2	
proizvođač	: KONCAR	štapova rotora	: 58	
nazivna brzina	: 1485	zaleta dnevno	:	
frekv.mreže Hz	: 50	vrsta rotora	: 2	
polova	: 4	mjerilo (mV/A)	: 6.666666	

```

-----razina oštećenja rotora----- ---zračni raspor-----
datum vrijeme struja          umjereno      opasno      dinamička  statička
DDMMYY HHMM  A    %  Indx 0    1    2    3    4    5    6    0    20    40    60 promj.
-----
040202 2312 34.5  45    .5 **          I---+---+---+---+---+---+> I---+---+---+---I ---
*****

```

Stanje rotorskog namota, preporuke: 2501 040202

Ovaj je rotorski namot u zdravom stanju i treba biti ponovo ispitan (provjeren) za 12 mjeseci od današnjeg dana ili nakon 200 zaleta, što prije prođe.

Stanje ekscentriciteta, preporuke: 2501 040202

Razina dinamičkog ekscentriciteta ovog motora započet će razvijanje sekundarnih kvarova. Provjerite mehaničke vibracije stroja i usporedite ih s prethodnim podacima. Motor mora biti ponovo ispitan najkasnije za mjesec dana od današnjeg datuma.

Zadnji rok za slijedeće snimanje stanja rotora - 04 veljače 2003
 Zadnji rok za slijedeće snimanje ekscentriciteta - 04 ožujka 2002

ANALIZA STANJA ROTORA - DETALJI: 2501

broj dijagnoze 200202042312

danas je 02-04-2002 23:12:55

nazivna struja = 58 indeks stanja rotora .47

struja tereta = 34.5

struja pr.hoda = 15.2

% opterećenja = 45

nazivna mrež.frekv. = 50

mj. mrež.frekv. = 50.03

nazivna brzina vrtnje = 1485

naz.brzina kod mrež.frekvencije = 1486.1

brzina očekivana kod % opterećenja = 1494.3

brzina iz 2 x klizanje = 1496.2

Omjer signal / šum = 54.6 = PRIHVATLJIV

Napon signala kod mrež.frekvenc. = .2305

ANALIZA EKSCENTRICITETA - DETALJI: 2501

Broj dijagnoze 200202042312

Datum analize 02-04-2002 23:16:01

naz. frekvencija mreže = 50 % dinamič. ekscentriciteta 32

mj.frekvencija mreže = 50.03

naz.brzina vrtnje = 1485

naz.brzina kod mrežne frekvencije = 1486.1

brzina mjerena iz utorskih harmonika = 1494.6

Iz analize stanja rotora,

brzina vrtnje iz 2 x klizanje = 1496.2

Razlika brzine vrtnje iz analize stanja rotora prema
mjerenoj brzini u analizi ekscentriciteta 1.5 r/min

Omjer signal / šum = 28.0 = NEPRIHVATLJIV

mV kod osnovnog utorskog harmonika = 1E-2

naziv motora	: 2502	naz.snaga	: 500	KW
mjesto	: JANAF	naz.napon (V)	: 6000	
svrha	:	naz.struja (A)	: 58	
pogon	:	korisnost	: 95%	
ser. broj	:	cos fi	: .88	
tip	: 4AZsh 905-4	struja pr.hoda	: 15.2	
proizvođač	: KONCAR	štapova rotora	: 58	
nazivna brzina	: 1485	zaleta dnevno	:	
frekv.mreže Hz	: 50	vrsta rotora	: 2	
polova	: 4	mjerilo (mV/A)	: 6.666666	

----razina oštećenja rotora-----										---zračni raspor-----						
datum vrijeme		struja		umjereno						opasno		dinamička statička				
DDMMYY	HHMM	A	%	Indx	0	1	2	3	4	5	6	0	20	40	60	promj.
040202	2252	35.9	48	.3	*											

Stanje rotorskog namota, preporuke: 2502 040202

Ovaj je rotorski namot u zdravom stanju i treba biti ponovo ispitan (provjeren) za 12 mjeseci od današnjeg dana ili nakon 200 zaleta, što prije prođe.

Stanje ekscentriciteta, preporuke: 2502 040202

Razina dinamičkog ekscentriciteta ovog motora započet će razvijanje sekundarnih kvarova. Provjerite mehaničke vibracije stroja i usporedite ih s prethodnim podacima. Motor mora biti ponovo ispitan najkasnije za mjesec dana od današnjeg datuma.

Zadnji rok za slijedeće snimanje stanja rotora - 04 veljače 2003
 Zadnji rok za slijedeće snimanje ekscentriciteta - 04 ožujka 2002

ANALIZA STANJA ROTORA - DETALJI: 2502

broj dijagnoze 200202042252

danas je 02-04-2002 22:52:20

nazivna struja	= 58	indeks stanja rotora	.32
struja tereta	= 35.9		
struja pr.hoda	= 15.2		
% opterećenja	= 48		

nazivna mrež.frekv. = 50

mj. mrež.frekv. = 50.05

nazivna brzina vrtnje = 1485

naz.brzina kod mrež.frekvencije = 1486.6

brzina očekivana kod % opterećenja = 1494.3

brzina iz 2 x klizanje = 1498.3

Omjer signal / šum = 67.5 = DOBAR

Napon signala kod mrež.frekvenc. = .2397

ANALIZA EKSCENTRICITETA - DETALJI: 2502

Broj dijagnoze 200202042252

Datum analize 02-04-2002 22:55:32

naz. frekvencija mreže	= 50	% dinamič. ekscentriciteta	40
mj.frekvencija mreže	= 50.05		

naz.brzina vrtnje = 1485

naz.brzina kod mrežne frekvencije = 1486.6

brzina mjerena iz utorskih harmonika = 1494

Iz analize stanja rotora,

brzina vrtnje iz 2 x klizanje = 1498.3

Razlika brzine vrtnje iz analize stanja rotora prema
mjerenoj brzini u analizi ekscentriciteta 4.2 r/min

Omjer signal / šum = 28.1 = NEPRIHVATLJIV

mV kod osnovnog utorskog harmonika = .0112

naziv motora	: 2503	naz.snaga	: 500	KW
mjesto	: JANAF	naz.napon (V):	6000	
svrha	:	naz.struja (A):	58	
pogon	:	korisnost	: 95%	
ser. broj	:	cos fi	: .88	
tip	: 4AZsh 905-4	struja pr.hoda:	15.2	
proizvođač	: KONCAR	štapova rotora:	58	
nazivna brzina:	1485	zaleta dnevno	:	
frekv.mreže Hz:	50	vrsta rotora	: 2	
polova	: 4	mjerilo (mV/A):	6.666666	

[illegible]

Stanje rotorskog namota, preporuke: 2503 040202

Ovaj je rotorski namot u zdravom stanju i treba biti ponovo ispitan (provjeren) za 12 mjeseci od današnjeg dana ili nakon 200 zaleta, što prije prođe.

Stanje ekscentriciteta, preporuke: 2503 040202

Razina dinamičkog ekscentriciteta ovog motora započet će razvijanje sekundarnih kvarova. Provjerite mehaničke vibracije stroja i usporedite ih s prethodnim podacima. Motor mora biti ponovo ispitan najkasnije za mjesec dana od današnjeg datuma.

Zadnji rok za slijedeće snimanje stanja rotora	- 04	veljače	2003
Zadnji rok za slijedeće snimanje ekscentriciteta	- 04	ožujka	2002

ANALIZA STANJA ROTORA - DETALJI: 2503

broj dijagnoze 200202042339
 danas je 02-04-2002 23:39:41

 nazivna struja = 58 indeks stanja rotora .34
 struja tereta = 33.4
 struja pr.hoda = 15.2
 % opterećenja = 42

nazivna mrež.frekv. = 50
 mj. mrež.frekv. = 50.03

nazivna brzina vrtnje = 1485
 naz.brzina kod mrež.frekvencije = 1486.1
 brzina očekivana kod % opterećenja = 1494.7
 brzina iz 2 x klizanje = 1497.8

Omjer signal / šum = 58.1 = PRIHVATLJIV
 Napon signala kod mrež.frekvenc. = .2226

ANALIZA EKSCENTRICITETA - DETALJI: 2503

Broj dijagnoze 200202042339
 Datum analize 02-04-2002 23:42:38

 naz. frekvencija mreže = 50 % dinamič. ekscentriciteta 32
 mj.frekvencija mreže = 50.03

naz.brzina vrtnje = 1485
 naz.brzina kod mrežne frekvencije = 1486.1

brzina mjerena iz utorskih harmonika = 1494.3

Iz analize stanja rotora,
 brzina vrtnje iz 2 x klizanje = 1497.8

Razlika brzine vrtnje iz analize stanja rotora prema
 mjerenoj brzini u analizi ekscentriciteta 3.5 r/min

Omjer signal / šum = 27.9 = NEPRIHVATLJIV
 mV kod osnovnog utorskog harmonika = 9E-3

naziv motora	: 2602	naz.snaga	: 1900 KW
mjesto	: JANAF	naz.napon (V)	: 6000
svrha	:	naz.struja (A)	: 209
pogon	:	korisnost	: 95%
ser. broj	:	cos fi	: .91
tip	: 4AZsh 1127-2	struja pr.hoda	: 41.6
proizvođač	: KONCAR	štapova rotora	: 52
nazivna brzina	: 2980	zaleta dnevno	:
frekv.mreže Hz	: 50	vrsta rotora	: 2
polova	: 2	mjerilo (mV/A)	: 1.666666

datum vrijeme		----razina oštećenja rotora-----										---zračni raspor-----				
DDMMYY	HHMM	A	%	Indx	0	1	2	3	4	5	6	0	20	40	60	promj.
050202	0003	113.	42	.8	***											
050202	0011	104.	37	.7	***											

Stanje rotorskog namota, preporuke: 2602 050202

Rotorski namot pokazuje znake povećanog otpora spojeva i treba ga ponovno pregledati u roku od devet mjeseci. Ako pogon s ovim motorom ima cikluse "teškog pogona" pregled treba obaviti unutar šest mjeseci ili nakon 50 zaleta (startanja), što prije nastupi.

Stanje ekscentriciteta, preporuke: 2602 050202

Razina dinamičkog ekscentriciteta ovog motora može uzrokovati vibracije u ležajevima. Provjerite mehaničke vibracije stroja. Ako su one u dozvoljenim granicama, ponovno ispitivanje mora se obaviti najkasnije za šest mjeseci.

UPOZORENJE:

Dvojbeni analiza - nedovoljna rezolucija za traženje poj. komponenti; ponovi kod većeg tereta, mjeri sa nižom frekvencijom, ili probaj USER PEAK SEARCH.

Zadnji rok za slijedeće snimanje stanja rotora - 05 studenog 2002
 Zadnji rok za slijedeće snimanje ekscentriciteta - 05 kolovoza 2002

ANALIZA STANJA ROTORA - DETALJI: 2602

broj dijagnoze 200202050003

danas je 02-05-2002 00:04:35

nazivna struja = 209 indeks stanja rotora .76

struja tereta = 113.8

struja pr.hoda = 41.6

% opterećenja = 43

nazivna mrež.frekv. = 50

mj. mrež.frekv. = 50

nazivna brzina vrtnje = 2980

naz.brzina kod mrež.frekvencije = 2980.4

brzina očekivana kod % opterećenja = 2991.8

brzina iz 2 x klizanje = 2994.3

Omjer signal / šum = 69.7 = DOBAR

Napon signala kod mrež.frekvenc. = .1896

ANALIZA EKSCENTRICITETA - DETALJI: 2602

Broj dijagnoze 200202050003

Datum analize 02-05-2002 00:07:07

naz. frekvencija mreže = 50 % dinamič. ekscentriciteta 24

mj.frekvencija mreže = 50

naz.brzina vrtnje = 2980

naz.brzina kod mrežne frekvencije = 2980.4

brzina mjerena iz utorskih harmonika = 2996

Iz analize stanja rotora,

brzina vrtnje iz 2 x klizanje = 2994.3

Razlika brzine vrtnje iz analize stanja rotora prema
mjerenoj brzini u analizi ekscentriciteta 1.6 r/min

Omjer signal / šum = 32.2 = PRIHVATLJIV

mV kod osnovnog utorskog harmonika = 1E-2

ANALIZA STANJA ROTORA - DETALJI: 2602

broj dijagnoze 200202050011

danas je 02-05-2002 00:12:09

nazivna struja = 209 indeks stanja rotora .66

struja tereta = 104.1

struja pr.hoda = 41.6

% opterećenja = 37

nazivna mrež.frekv. = 50

mj. mrež.frekv. = 50

nazivna brzina vrtnje = 2980

naz.brzina kod mrež.frekvencije = 2980.4

brzina očekivana kod % opterećenja = 2993

brzina iz 2 x klizanje = 2994.8

Omjer signal / šum = 66.2 = DOBAR

Napon signala kod mrež.frekvenc. = .1735

naziv motora	: 2603	naz.snaga	: 1900 KW
mjesto	: JANAF	naz.napon (V)	: 6000
svrha	:	naz.struja (A)	: 209
pogon	:	korisnost	: 95%
ser. broj	:	cos fi	: .91
tip	: 4AZsh 1127-2	struja pr.hoda	: 41.6
proizvođač	: KONCAR	štapova rotora	: 52
nazivna brzina	: 2980	zaleta dnevno	:
frekv.mreže Hz	: 50	vrsta rotora	: 2
polova	: 2	mjerilo (mV/A)	: 1.666666

datum vrijeme struja		----razina oštećenja rotora-----										---zračni raspor-----				
DDMMYY	HHMM	A	%	Indx	0	1	2	3	4	5	6	0	20	40	60	promj.
040202	2329	120.	46	.4	*											

Stanje rotorskog namota, preporuke: 2603 040202

Ovaj je rotorski namot u zdravom stanju i treba biti ponovo ispitan (provjeren) za 12 mjeseci od današnjeg dana ili nakon 200 zaleta, što prije prođe.

Stanje ekscentriciteta, preporuke: 2603 040202

Ovo je normalna razina dinamičkog ekscentriciteta. Stoga se može smatrati da je stanje ovog motora zadovoljavajuće. Ponovno ispitivanje treba obaviti za 9-12 mjeseci od današnjeg dana.

Zadnji rok za slijedeće snimanje stanja rotora - 04 veljače 2003
 Zadnji rok za slijedeće snimanje ekscentriciteta - 04 veljače 2003

ANALIZA STANJA ROTORA - DETALJI: 2603

broj dijagnoze 200202042329
 danas je 02-04-2002 23:29:28

 nazivna struja = 209 indeks stanja rotora .36
 struja tereta = 120.3
 struja pr.hoda = 41.6
 % opterećenja = 47

nazivna mrež.frekv. = 50
 mj. mrež.frekv. = 50

nazivna brzina vrtnje = 2980
 naz.brzina kod mrež.frekvencije = 2980.4
 brzina očekivana kod % opterećenja = 2991
 brzina iz 2 x klizanje = 2993.8

Omjer signal / šum = 65.0 = DOBAR
 Napon signala kod mrež.frekvenc. = .2006

ANALIZA EKSCENTRICITETA - DETALJI: 2603

Broj dijagnoze 200202042329
 Datum analize 02-04-2002 23:31:49

 naz. frekvencija mreže = 50 % dinamič. ekscentriciteta 20
 mj.frekvencija mreže = 50

naz.brzina vrtnje = 2980
 naz.brzina kod mrežne frekvencije = 2980.4

brzina mjerena iz utorskih harmonika = 2994.7

Iz analize stanja rotora,
 brzina vrtnje iz 2 x klizanje = 2993.8

Razlika brzine vrtnje iz analize stanja rotora prema
 mjerenoj brzini u analizi ekscentriciteta .8 r/min

Omjer signal / šum = 37.1 = PRIHVATLJIV
 mV kod osnovnog utorskog harmonika = 2E-2

naziv motora	: 2702	naz.snaga	: 1900 KW
mjesto	: JANAF	naz.napon (V)	: 6000
svrha	:	naz.struja (A)	: 209
pogon	:	korisnost	: 95%
ser. broj	:	cos fi	: .91
tip	: 4AZsh 1127-2	struja pr.hoda	: 41.6
proizvođač	: KONCAR	štapova rotora	: 52
nazivna brzina	: 2980	zaleta dnevno	:
frekv.mreže Hz	: 50	vrsta rotora	: 2
polova	: 2	mjerilo (mV/A)	: 1.666666

datum vrijeme		----razina oštećenja rotora-----										---zračni raspor-----				
DDMMYY	HHMM	A	%	Indx	0	1	2	3	4	5	6	0	20	40	60	promj.
040202	2208	98.4	33	.1	*											
040202	2220	100.	34	.3	*											
040202	2227	108.	39	.2	*											

Stanje rotorskog namota, preporuke: 2702 040202

Ovaj je rotorski namot u zdravom stanju i treba biti ponovo ispitan (provjeren) za 12 mjeseci od današnjeg dana ili nakon 200 zaleta, što prije prođe.

Stanje ekscentriciteta, preporuke: 2702 040202

Razina dinamičkog ekscentriciteta ovog motora može uzrokovati vibracije u ležajevima. Provjerite mehaničke vibracije stroja. Ako su one u dozvoljenim granicama, ponovno ispitivanje mora se obaviti najkasnije za šest mjeseci.

Zadnji rok za slijedeće snimanje stanja rotora - 04 veljače 2003
Zadnji rok za slijedeće snimanje ekscentriciteta - 04 kolovoza 2002

Motor Notebook:

mjerilo 1.25 umjesto 1.666 (98 A umj. 73) premaleno opterećenje

 ANALIZA STANJA ROTORA - DETALJI: 2702

 broj dijagnoze 200202042208
 danas je 02-04-2002 22:08:49

nazivna struja	= 209	indeks stanja rotora	.11
struja tereta	= 98.4		
struja pr.hoda	= 41.6		
% opterećenja	= 33		

nazivna mrež.frekv.	= 50
mj. mrež.frekv.	= 50.02

nazivna brzina vrtnje	= 2980
naz.brzina kod mrež.frekvencije	= 2981.4
brzina očekivana kod % opterećenja	= 2994.6
brzina iz 2 x klizanje	= 2987.3

Omjer signal / šum	= 72.9	= DOBAR
Napon signala kod mrež.frekvenc.	= .1230	

Razina dinamičkog ekscentriciteta ovog motora je tolika da bi mogla uzrokovati razvijanje sekundarnih kvarova. Provjerite mehaničke vibracije stroja i usporedite ih s prethodnim podacima. Ovaj motor možete nastaviti koristiti u pogonu samo ako je on kritičan za rad vašeg postrojenja. Ako je moguće, treba obaviti statičku provjeru zračnog rasporeda dok motor stoji. Ako stroj nastavite koristiti u pogonu, potrebno je ponovno ispitivanje svakog tjedna.

 ANALIZA EKSCENTRICITETA - DETALJI: 2702

 Broj dijagnoze 200202042208
 Datum analize 02-04-2002 22:12:34

naz. frekvencija mreže	= 50	% dinamič. ekscentriciteta	44
mj.frekvencija mreže	= 50.02		

naz.brzina vrtnje	= 2980
naz.brzina kod mrežne frekvencije	= 2981.4

brzina mjerena iz utorskih harmonika	= 2993.5
--------------------------------------	----------

Iz analize stanja rotora,	
brzina vrtnje iz 2 x klizanje	= 2987.3

Razlika brzine vrtnje iz analize stanja rotora prema mjerenoj brzini u analizi ekscentriciteta 6.1 r/min

Omjer signal / šum	= 7.7	= NEPRIHVATLJIV
mV kod osnovnog utorskog harmonika	= 3E-3	

ANALIZA STANJA ROTORA - DETALJI: 2702

broj dijagnoze 200202042220
 danas je 02-04-2002 22:20:32

 nazivna struja = 209 indeks stanja rotora .32
 struja tereta = 100.4
 struja pr.hoda = 41.6
 % opterećenja = 35

nazivna mrež.frekv. = 50
 mj. mrež.frekv. = 50.03

nazivna brzina vrtnje = 2980
 naz.brzina kod mrež.frekvencije = 2982.3
 brzina očekivana kod % opterećenja = 2995.3
 brzina iz 2 x klizanje = 2995.3

Omjer signal / šum = 71.9 = DOBAR
 Napon signala kod mrež.frekvenc. = .1673

Stanje ekscentriciteta, preporuke

Razina dinamičkog ekscentriciteta ovog motora započet će razvijanje sekundarnih kvarova. Provjerite mehaničke vibracije stroja i usporedite ih s prethodnim podacima. Motor mora biti ponovo ispitan najkasnije za mjesec dana od današnjeg datuma.

ANALIZA EKSCENTRICITETA - DETALJI: 2702

Broj dijagnoze 200202042208
 Datum analize 02-04-2002 22:23:00

 naz. frekvencija mreže = 50 % dinamič. ekscentriciteta 32
 mj.frekvencija mreže = 50.03

naz.brzina vrtnje = 2980
 naz.brzina kod mrežne frekvencije = 2982.3

brzina mjerena iz utorskih harmonika = 2995

Iz analize stanja rotora,
 brzina vrtnje iz 2 x klizanje = 2995.3

Razlika brzine vrtnje iz analize stanja rotora prema
 mjerenoj brzini u analizi ekscentriciteta .2 r/min

Omjer signal / šum = 23.7 = NEPRIHVATLJIV
 mV kod osnovnog utorskog harmonika = 6E-3

111 -115 A

ANALIZA STANJA ROTORA - DETALJI: 2702

broj dijagnoze 200202042227

danas je 02-04-2002 22:27:27

nazivna struja = 209 indeks stanja rotora .19

struja tereta = 108.5

struja pr.hoda = 41.6

% opterećenja = 40

nazivna mrež.frekv. = 50

mj. mrež.frekv. = 49.94

nazivna brzina vrtnje = 2980

naz.brzina kod mrež.frekvencije = 2976.7

brzina očekivana kod % opterećenja = 2988.7

brzina iz 2 x klizanje = 2986.8

Omjer signal / šum = 65.2 = DOBAR

Napon signala kod mrež.frekvenc. = .1809

Stanje ekscentriciteta, preporuke

Razina dinamičkog ekscentriciteta ovog motora može uzrokovati vibracije

u ležajevima. Provjerite mehaničke vibracije stroja. Ako su one u dozvoljenim granicama, ponovno ispitivanje mora se obaviti najkasnije za šest mjeseci.

ANALIZA EKSCENTRICITETA - DETALJI: 2702

Broj dijagnoze 200202042208

Datum analize 02-04-2002 22:29:59

naz. frekvencija mreže = 50 % dinamič. ekscentriciteta 28

mj.frekvencija mreže = 49.94

naz.brzina vrtnje = 2980

naz.brzina kod mrežne frekvencije = 2976.7

brzina mjerena iz utorskih harmonika = 2991

Iz analize stanja rotora,

brzina vrtnje iz 2 x klizanje = 2986.8

Razlika brzine vrtnje iz analize stanja rotora prema mjerenoj brzini u analizi ekscentriciteta 4.2 r/min

Omjer signal / šum = 27.8 = NEPRIHVATLJIV

mV kod osnovnog utorskog harmonika = 10E-3

naziv motora	: 2703	naz.snaga	: 1900 KW
mjesto	: JANAF	naz.napon (V)	: 6000
svrha	:	naz.struja (A)	: 209
pogon	:	korisnost	: 95%
ser. broj	:	cos fi	: .91
tip	: 4AZsh 1127-2	struja pr.hoda	: 41.6
proizvođač	: KONCAR	štapova rotora	: 52
nazivna brzina	: 2980	zaleta dnevno	:
frekv.mreže Hz	: 50	vrsta rotora	: 2
polova	: 2	mjerilo (mV/A)	: 1.666666

datum vrijeme		----razina oštećenja rotora-----											---zračni raspor-----			
DDMMYY	HHMM	A	%	Indx	0	1	2	3	4	5	6	0	20	40	60	promj.
040202	2302	119.	46	.4	*											

Stanje rotorskog namota, preporuke: 2703 040202

Ovaj je rotorski namot u zdravom stanju i treba biti ponovo ispitan (provjeren) za 12 mjeseci od današnjeg dana ili nakon 200 zaleta, što prije prođe.

Stanje ekscentriciteta, preporuke: 2703 040202

Ovo je normalna razina dinamičkog ekscentriciteta. Stoga se može smatrati da je stanje ovog motora zadovoljavajuće. Ponovno ispitivanje treba obaviti za 9-12 mjeseci od današnjeg dana.

Zadnji rok za slijedeće snimanje stanja rotora - 04 veljače 2003
 Zadnji rok za slijedeće snimanje ekscentriciteta - 04 veljače 2003

ANALIZA STANJA ROTORA - DETALJI: 2703

broj dijagnoze 200202042302

danas je 02-04-2002 23:02:12

nazivna struja = 209 indeks stanja rotora .36

struja tereta = 119.2

struja pr.hoda = 41.6

% opterećenja = 46

nazivna mrež.frekv. = 50

mj. mrež.frekv. = 50

nazivna brzina vrtnje = 2980

naz.brzina kod mrež.frekvencije = 2980.4

brzina očekivana kod % opterećenja = 2991.1

brzina iz 2 x klizanje = 2993.8

Omjer signal / šum = 66.0 = DOBAR

Napon signala kod mrež.frekvenc. = .1988

ANALIZA EKSCENTRICITETA - DETALJI: 2703

Broj dijagnoze 200202042302

Datum analize 02-04-2002 23:04:40

naz. frekvencija mreže = 50 % dinamič. ekscentriciteta 20

mj.frekvencija mreže = 50

naz.brzina vrtnje = 2980

naz.brzina kod mrežne frekvencije = 2980.4

brzina mjerena iz utorskih harmonika = 2994

Iz analize stanja rotora,

brzina vrtnje iz 2 x klizanje = 2993.8

Razlika brzine vrtnje iz analize stanja rotora prema
mjerenoj brzini u analizi ekscentriciteta .1 r/min

Omjer signal / šum = 37.3 = PRIHVATLJIV

mV kod osnovnog utorskog harmonika = 2E-2

slike spektra statorske struje:

