

KOMPJUTERSKO MERENJE KARAKTERISTIKA  
ENERGETSKIH PRETVARAČA

Dr Vladan Vučković  
Dr Petar Miljanić  
Elektrotehnički institut "Nikola Tesla"  
Beograd

SADRŽAJ

Opisuje se sistem za kompjutersko merenje karakteristika energetskih pretvarača, kao i dva do sada razvijena programa EeSTAT i EeTERM. Kod prvoga, koji služi za ispitivanje statičkih ulazno-izlaznih karakteristika naročito je posvećena pažnja tačnom merenju naizmeničnih veličina sa jako izobličnim oblicima talasa. Drugi je namenjen dugotrajnom ispitivanju zagrevanja pojedinih kritičkih tačaka u pretvaraču. Oba programa, kao i sistem, ispitani su i praktično upotrebljeni u razvojnom i primo-predajnim ispitivanjima pretvarača.

THE MEASUREMENTS ON POWER CONVERTERS  
BY MEANS OF A COMPUTER SYSTEM

A computer system for testing of power converters is described. The description of two programs, EeSTAT and EeTERM, developed up to date, is also given. In the first one, prepared for static I/O characteristics of converters, special attention is paid to the accurate A.C. measurements with highly distorted wave forms. The second program is intended for long term temperature tests of critical parts inside the converter. Both programs and the system itself are used for laboratory and production testing of converters.

UVOD

U cilju automatizacije prijemnih ili razvojnih ispitivanja energetskih pretvarača razradjen je, hardverski i softverski, sistem za kompjutersko merenje njihovih karakteristika. Upotrebljen je sistem za akviziciju podataka HP 3052A, koji sadrži univerzalni digitalni voltmetar visoke klase, brzi digitalni voltmetar (do 5700 merenja u sekundi),

skaner, digitalni časovnik, printer, ploter i stoni kompjuter. Svi instrumenti, skaner i časovnik vezani su preko standardizovanih IEC-sabirnica za kompjuter koji upravlja celokupnim sistemom, uzima i obradjuje merne podatke i isporučuje ih printeru, ploteru ili ekranu u željenim oblicima. Ovom sistemu dodat je sistem šantova, predotpora i potenciometara preko kojih se dovode podaci o strujama i naponima sa ulaza i izlaza pretvarača, kao i sistem za automatsku promenu opterećenja.

Do sada su razvijena dva programa. Prvi, za ispitiva-nje statičkih karakteristika (EeSTAT), daje tablički i grafički sredjene podatke o ulaznim i izlaznim strujama, naponima, snagama, učestanostima, klir-faktoru, sadržaju pojedinih harmonika, stepenu iskorišćenja, odstupanju ovih veličina od predviđenih itd.-sve pri raznim opterećenjima i raznim odstupanjima ulaznog napona. Pri tome je razradjena posebna metoda za precizno merenje snage pomoću voltmetra kod izobličenih talasa napona i struja.

Drugi program (EeTERM) namenjen je dugotrajnom ispiti-vanju zagrevanja pojedinih kritičkih tačaka u pretvaraču pomoću niza termosondi. Dobijaju se podaci o opterećenju i temperaturama u funkciji vremena.

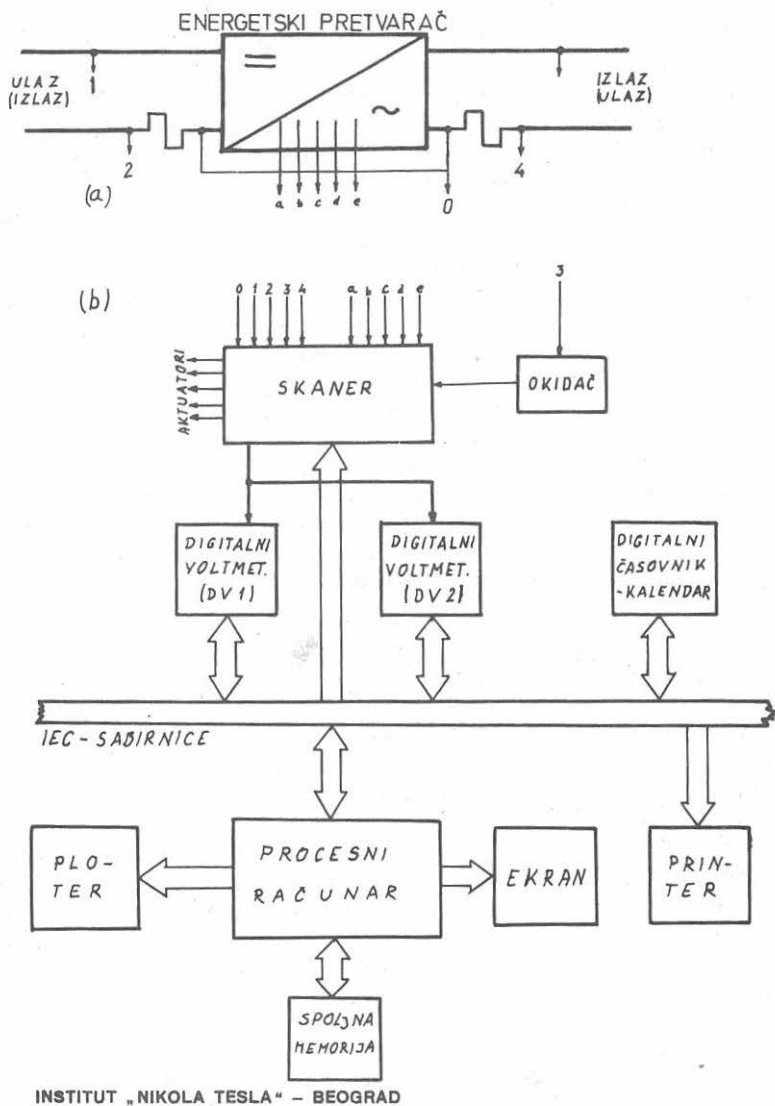
U sledećem tekstu biće dat opis sistema, kao i dva pomenuta programa.

#### Opis sistema za merenje

Na sl.1 data je kompletna ali uprošćena šema merenja. U gornjem delu slike (a) prikazan je energetska pretvarač sa privezanim izvodima za merenje ulaznog i izlaznog napona i ulazne i izlazne struje. Radi jasnijeg prikazivanja uzet je monofazni invertor (ili ispravljač, ako je ulaz sa desne strane), medjutim tu može stajati bilo koji pretvarač, monofazni ili trofazni, sa očevidnim dopunama u šemi. Iz istog razloga uzet je slučaj merenja napona bez delitelja ili predotpora (izvodi 1 i 3), merenje struje preko šantova (2 i 4) i to sve sa jednim zajednički krajem (O). Naravno kod većih struja, odnosno napona ili kada je potrebno sačuvati galvansku izolaciju izmedju ulaza i izlaza pretvarača, šema se može izvesti sa strujnim, odnosno naponskim transformatorom na naizmeničnoj strani.

Na istoj slici su takodje prikazani izvodi (sa slovnim oznakama) koji polaze od niza termosondi ugradjenih unutar pretvarača, neophodnih kada se vrši ispitivanje zagrevanja.

Instrumentalni deo šeme (sl.1b) sastoji se iz skanera (u koji se dovode merni naponi sa izvoda 1,2,3 i 4 u odnosu na zajednički kraj O, kao i naponi iz termosondi), dva digitalna voltmetra (za merenje napona koji odabere skaner), procesnog



Sl.1. Šema merenja: (a) pretvarač sa mernim izvodima,  
(b) instrumentacija

računara (koji preko digitalnih sabirnica upravlja svim instrumentima, prima i obradjuje izmerene vrednosti), digitalnog sata (koji služi kod merenja zagrevanja), okidnog uredjaja, printera (za štampanje protokola), plotera (za crtanje talasnih oblika) i spoljne memorije (za duže čuvanje mernih rezultata i programa na magnetnoj traci ili disku).

Pod dejstvom programa koji izvodi procesni računar, skaner dovodi uzastopno četiri analogne merne veličine na jedan ili drugi voltmetar, koji pak sa svoje strane šalju merne podatke u digitalnoj formi računaru. Posle svakog izvedenog merenja računar obradjuje ove podatke i rezultate objavljuje u vidu tablice na printeru ili u vidu grafičkih dijagrama na ploteru ili ih pak prenosi u spoljnu memoriju (u magnetnu kasetu ili na disk) radi čuvanja. Putem posebnih, aktuatorskih kanala skanera, uz pomoć odgovarajućih releja i kontaktora, moguće je automatizovati i promenu uslova merenja (izbor radne tačke), npr. promenu opterećenja, ulaznog napona ili učestanosti pretvarača.

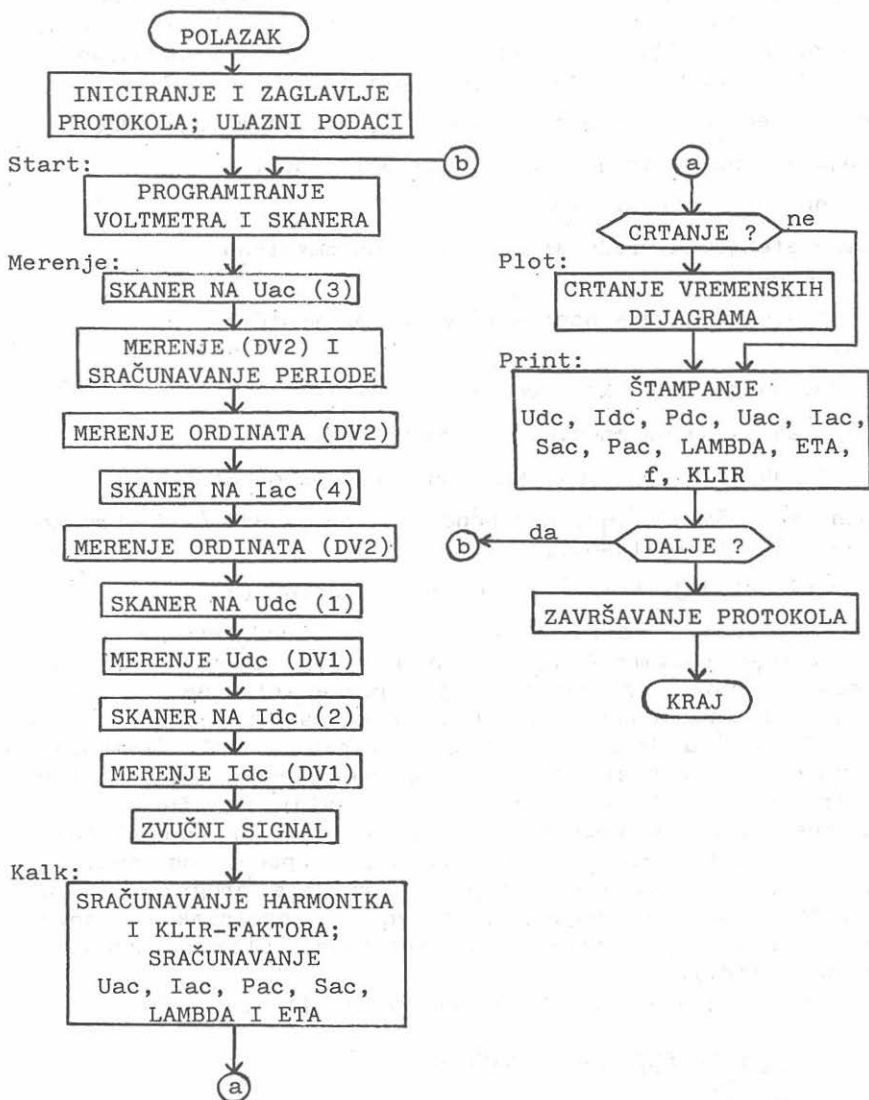
Upotrebljen je sistem za automatsku akviziciju podataka HP3052A firme Hewlett-Packard, sa računarom HP9825 kao jezgrom. Celokupna komunikacija izmedju pojedinih delova sistema, sa izuzetkom spoljne memorije i plotera, vrši se preko standardizovanih IEC-sabirnica.

#### MERENJE STATIČKIH KARAKTERISTIKA (PROGRAM "EeSTAT")

Za izvodjenje ovih merenja koristi se celokupna konfiguracija na sl.1 izuzev digitalnog sata i, naravno, termosondi i odgovarajućih kanala skanera. Ploter se može koristiti po izboru.

Sam proces merenja najbolje se može opisati pomoću programskog dijagrama na sl.2. Na samom početku program zahteva od operatora ubacivanje ulaznih podataka preko tastature računara. To su, izmedju ostalog, merni faktori (odnosi izmedju mernih veličina i odgovarajućih napona koji dolaze na skaner, koji zavise od primenjenih delitelja, predotpora, šantova i mernih transformatora), redni brojevi skanerovih kanala, željeni najviši harmonik, broj merenja, opseg i način rada voltmetra, datum, tip i oznaka pretvarača itd. Posle toga računar daje naloge za podešavanje voltmetra i štampanje zaglavlja tablice protokola, čime se završava uvodni deo programa.

Dalje odvijanje programa vrši se u kružnom toku. U prvom delu ("Merenje") računar daje uzastopne naloge skaneru za uključivanje pojedinih kanala, odnosno dovodjenje odgovarajućih veličina na voltmetre. Posle svakog takvog naloga proziva



Sl.2. Dijagram toka programa EeSTAT

se odgovarajući voltmetar i ubacuje niz mernih podataka u memoriju računara. U drugom delu programa ("Kalk"), koji sledi kada se obidju svi kanali, prelazi se na sračunavanje, posle čega se dobijaju sledeći rezultati:

- srednja vrednost napona na strani jednosmerne struje ( $U_{dc}$ ),
- srednja vrednost struje na istoj strani ( $I_{dc}$ ),
- snaga na istoj strani ( $P_{dc}$ ),
- "prava" efektivna vrednost napona na naizmeničnoj strani ( $U_{ac}$ ),
- "prava" efektivna vrednost struje na naizmeničnoj strani ( $I_{ac}$ ),
- prividna snaga ( $S_{ac}$ ) kao proizvod  $U_{ac}$  i  $I_{ac}$ ,
- srednja snaga na naizmeničnoj strani ( $P_{ac}$ ),
- "pravi" faktor snage ( $\lambda$ ), kao odnos  $P_{ac}$  prema  $S_{ac}$ ,
- stepen iskorišćenja ( $\eta$ ), kao odnos  $P_{ac}$  prema  $P_{dc}$  (ili obrnuto ako je reč o ispravljaču),
- faktor izobličenja talasa naizmeničnog napona ( $k$ ).

U sledećem delu ("Plot") izvodi se crtanje jedne periode talasa naizmeničnog napona i struje pomoću plotera. Ovaj deo se može iz svakog pojedinačnog ciklusa merenja izbaciti radi ubrzavanja rada ili ako nedostaje ploter.

Najzad, u delu "Print" na printeru se vrši štampanje svih navedenih vrednosti u prvi, odnosno naredni red tablice protokola. Izvodjenje programa se zaustavlja i računar čeka odluku operatora za početak daljeg merenja, u kom slučaju se postupak ponavlja. U medjuvremenu, a počev od zvučnog signala koji se javlja na kraju mernog dela programa, mogu se izvršiti sve intervencije potrebne za prelazak na nove uslove merenja (npr. promena opterećenja, ulaznog napona, učestanosti, itd.).

Primer jednog mernog protokola dat je na sl. 3a.

#### METODA MERENJA NAIZMENIČNIH VELIČINA

Veličine na jednosmernoj strani pretvarača mere se univerzalnim digitalnim voltmetrom visoke klase (DV1) na konvencionalan način, tako da se oko toga nećemo zadržavati.

Primena brzog voltmetra DV2, koji je u stanju da izvrši i do 5700 merenja u sekundi, omogućava da se u širokom opsegu učestanosti (sve do kraja zvučnog spektra) mogu se sasvim prihvatljivom tačnošću dobiti efektivne i srednje

SIN-1500-220

INSTITUT TESLA BEOGRAD - OOUR LAR  
25/3-79

Udc(V)	Idc(A)	Pdc(W)	Uac(V)	Iac(A)	Sac(VA)	Pac(W)	lambda	eta %	f(Hz)	klir %
200.32	10.966	2196.7	222.68	9.227	2054.6	2051.1	0.998	93.37	50.13	3.94
221.42	9.869	2185.3	220.41	9.178	2022.9	2022.6	1.000	92.56	50.12	3.13
241.09	10.092	2433.0	220.94	9.112	2013.2	2012.7	1.000	82.73	50.11	2.90

(a)

SIN-1500-220

INSTITUT TESLA BEOGRAD - OOUR LAR  
1/4-79

R.br.	Vreme	Ambi	Trafo	Unutra	Thyr	Temp 4	Opt.(A)
1	15:05:00	19.8	37.2	22.3	38.5	0.0	6.16
2	15:10:00	20.1	40.4	22.5	41.2	0.0	6.16
3	15:15:00	20.4	43.3	23.4	43.3	0.0	6.16
4	15:20:00	20.7	45.9	23.9	44.7	0.0	6.15
5	15:25:00	20.9	48.3	24.4	45.9	0.0	6.15

(b)

Sl.3. Primeri zaglavlja i prvih nekoliko redova  
automatskih protokola o ispitivanju  
statičkih (a) i termičkih (b) karakteristika

vrednosti naizmeničnih veličina, koristeći se jednostavno njihovom formalnom definicijom. Drugim rečima, ovaj voltmetar sposoban je da snabde odredjen memorijski blok računara (matrica  $V$ ) odredjenim brojem (N) ordinata jedne periode bilo kakvog periodičnog talasa, što omogućava da se kasnije iz tih podataka ne samo izračuna efektivna i srednja vrednost talasa, već izvrši i njegova harmonijska analiza. Ovo je osobito značajno kod merenja na energetskim pretvaračima, gde se po pravilu radi sa izobličnim naizmeničnim talasima.

Drugo korisno svojstvo ovog voltmetra, a to je mogućnost programskog relativiziranja trenutka merenja u odnosu na spoljašnjokidni impuls (triger), sinhron sa mernim talasom, omogućava da se dobiju i korelacione veličine dvaju sinhronih talasa, kao što je snaga ili faktor snage u slučaju da se radi o naizmeničnom naponu i odgovarajućoj struji. Drugim rečima, voltmetar vrši merenje na nalog iz računara, ali tek kada od prvog sledećeg okidnog impulsa prodje izvesno odlaganje ( $d$ ), čija se veličina saopštava zajedno sa nalogom.

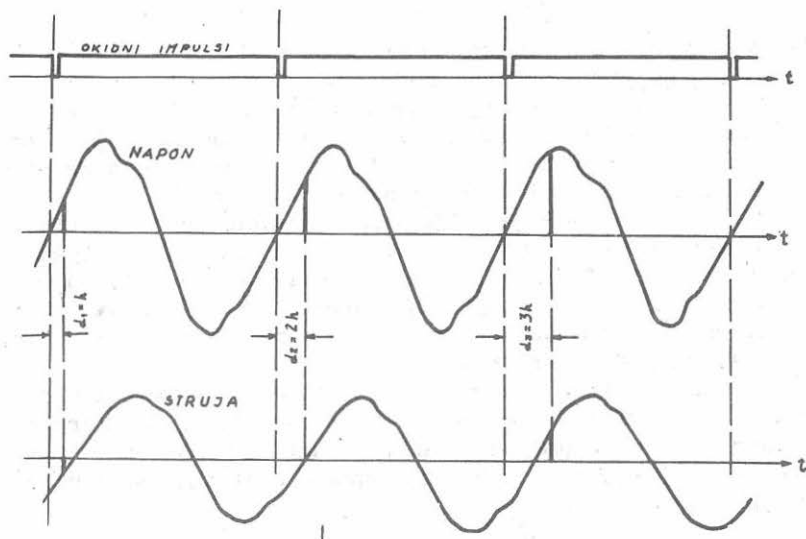
O merenju perioda, odnosno učestanosti, izračunavanju spektra viših harmonika i faktora izobličenja neće se ovde detaljnije govoriti, jer je to opisano u literaturi (1). Pomenimo samo da se merenje perioda zasniva na traženju dvaju uzastopnih preseka talasa sa apscisom pod istim nagibom metodom uzastopnog približavanja. S obzirom na visoku stabilnost sistemskog kristala i veliku rezolucionu moć odredjivanja programiranih vremenskih intervala postiže se dosta visoka tačnost merenja perioda ( $\pm 100$  ns), što daje tačnost merenja industrijskih učestanosti od nekoliko milionitih delova - naravno pod uslovom da je tokom celog merenja (jednu do dve sekunde) talas stabilan (bez drhtanja i sl.). Harmonijska analiza, koja se može protegnuti sve do kraja zvučnog opsega, vrši se na osnovu diskretne Furijeve transformacije, uz korišćenje Gercelovog algoritma (2).

Ovde ćemo detaljnije opisati metodu i tok programa, koji je razradjen u Institutu "Nikola Tesla", u Beogradu, za merenje i sračunavanje efektivnih vrednosti naizmeničnih napona i struja, snage i faktora snage.

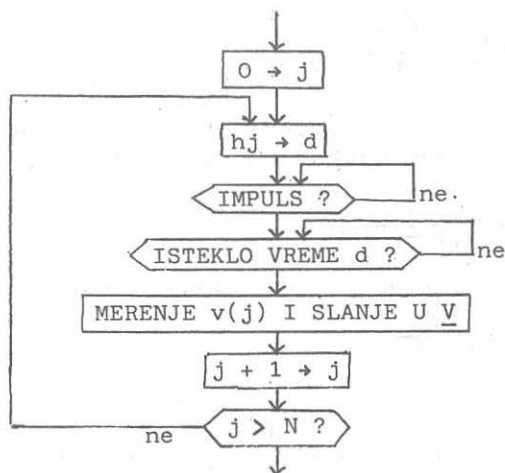
Na sl.4 prikazane su tri periode jednog neharmoničnog talasa, kao i okidni impulsi, sinhroni sa talasom, koji se preko okidnog uredjaja dovode na poseban ulaz voltmetra (vidi takodje sl.1b). Kao što se vidi na slici program je sačinjen tako da se u svakoj periodi odlaganje merenja posle impulsa  $d$  poveća za uvek isti priraštaj  $h$ . Ako se izabere

$$h=T/N$$

gde je T perioda talasa, a N proizvoljan ceo broj, i saopšti voltmetru pre svakog merenja odlaganje



Sl.4. Uz opis metode za merenje naizmeničnih veličina



Sl.5. Dijagram toka potprograma za merenje naizmeničnih veličina

$$d=jh \quad (j=0,1,2,\dots,N)$$

posle  $N+1$  periode imaćemo podatke o svih  $N$  ordinata jedne periode, uz jedan ponovljeni podatak.

Vrše se dve serije ovakvih merenja: jednom za napon, pri čemu se podaci konačno smeštaju u matricu  $\underline{V}$ , odnosno u odgovarajući memorijski blok računara, a drugi put za struju, sa podacima u matrici  $\underline{I}$  - svaka sa  $N+1$  elemenata.

Na sl.5 dat je dijagram toka opisanog potprograma, koji, kao što je rečeno, ide dva puta (sl.2). Pretpostavlja se da je perioda  $T$  već izmerena i odabran broj  $N$ . Napomenimo da se vrednosti  $v_0$  odn.,  $u_0$  i  $i_0$ , premda se ne koriste u sračunavanju, mere zato da bi se pri crtanju na ploteru dobila potpuna slika jedne periode.

Imajući tako u memoriji računara  $N$  ordinata naponskog talasa i isto toliko strujnog u matricama  $\underline{V}$  i  $\underline{I}$  sa korelacijom sadržanom u indeksima, prelazi se na sračunavanje stvarnih ("pravih") efektivnih vrednosti napona i struje po diskretizovanim definicionim obrascima

$$U_{ac} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_j^2}$$

$$I_{ac} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N i_j^2}$$

gde su  $u_j$  i  $i_j$  elementi matrica  $\underline{V}$  i  $\underline{I}$ . Najzad, sračunava se stvarna (aktivna, srednja) snaga po obrascu

$$P_{ac} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_j i_j$$

i stvarni ("pravi") faktor snage (ne  $\cos \varphi$ !) kao odnos

$$\lambda = \frac{P_{ac}}{U_{ac} I_{ac}}$$

Sveukupna tačnost merenja zavisi od tačnosti samog voltmetra (u konkretnom slučaju reda  $\pm 0,05\%$ ), tačnosti, odnosno repetibilnosti njegovog programabilnog odlaganja (reda 10 ns), tačnosti šantova, predotpora i dr., ali i od izbora broja merenja  $N$ . Ukoliko je taj broj veći tačnost je, zbog sve manjeg uticanja diskretizacije, naravno veća. S druge strane trajanje merenja se produžava, a time i rizik da će eventualna promena merenog talasa omesti rezultat.

U konkretnom slučaju, prilikom merenja kod jednog invertora snage 1,5 kVA u učestanosti 50 Hz, već sa  $N=100$  (dakle merenje u trajanju od oko 4 sekundi) dobijeni su

zadovoljavajući rezultati uporednim merenjem sa jednim overenim elektronskim vatmetrom klase 0,1 (3).

MERENJE ZAGREVANJA  
(PROGRAM "EeTERM")

S obzirom na dugotrajnost ovih merenja konfiguracija na sl.1 obavezno sadrži digitalni sat. Za razliku od prethodnog postupka ovaj sat je taj, a ne operator, koji odlučuje kada će sistem izvršiti svaki naredni ciklus merenja (npr. svakih nekoliko minuta, u zavisnosti od očekivanih termičkih vremenskih konstanti).

Pored toga, s obzirom da ovde nije potrebno poznavanje svih električnih veličina, niti neka posebna tačnost, izbačen je voltmetar DV2. Kao merilo opterećenja zadržana je samo izlazna struja, merena voltmetrom DV1.

Program je inače vrlo slične strukture kao prethodni. Posle uvodnog dela sa ubacivanjem ulaznih podataka, štampanja zaglavlja ispitnog protokola i podešavanja voltmetra, skaner, preko svojih posebnih kanala za prihvatanje struja iz termosondi, priključuje redom svaku sondu na voltmetar, koji šalje merne podatke računaru. Za razliku od prethodnog slučaja vrednost temperature se sračunava, pomoću posebnog potprograma sa ugrađenim tabličkim podacima za pojedine termospregeve, odmah posle svakog merenja i čuva u memoriji računara. Kada se obidju sve sonde otštampa se odgovarajući red u protokolu, pa se izvodjenje programa zaustavlja sve dok ne dodje novi podsticaj od sata, kada započinje novi ciklus merenja. Po završetku merenja, s obzirom da su svi rezultati sačuvani u memoriji, mogu se na poziv nacrtati krive zagrevanja u finkciji vremena.

U primeru na sl.3b mereno je nekoliko tačaka u unutrašnjosti jednog invertora (na izlaznom transformatoru, na jednom od tiristora u unutrašnjosti jednog podsklopa itd.), kao i temperatura ambijenta, pomoću termospregeva bakar-konstantan.

ZAKLJUČCI

Metoda merenja efektivnih vrednosti i srednje snage kod naizmjeničnih veličina sa izobličnim oblicima talasa, koja se bazira na sinhronizovanom merenju (semplovanju) ordinata korelativnih talasa uz pomoć brzog digitalnog voltmetra i kompjuterskog sistema, daje već kod relativno malog broja merenja (od 100 pri 50 Hz) rezultate visoke

tačnosti.

Metoda je primenjena u okviru programa za merenje statičkih karakteristika energetskih pretvarača, koji uz korišćenje sistema za akviziciju podataka omogućava automatizaciju serijskih ispitivanja pretvarača, sa sledstvenim povećanjem pouzdanosti merenja i uštedama u vremenu i radu.

Program za ispitivanje zagrevanja pretvarača efektivan je već i kod pojedinačnih testiranja, s obzirom na dugotrajnost i velike pauze između pojedinih merenja.

#### REFERENCE

(1) Model 3052A Automatic Data Acquisition System (Manual); Hewlett-Packard Company, 1976.

(2) Gold et al.: Digital Processing of Signals; McGraw-Hill, 1969.

(3) P. Miljanić et al.: On the electronic three-phase active and reactive power measurements, IEEE Transactions on IM; Dec. 1978, Vol. IM-27, Nr 4.