

## REALIZACIJA MIKROPROCESORSKI UPRAVLJANOG ASINHRONOG POGONA SA STRUJNIM INVERTOROM

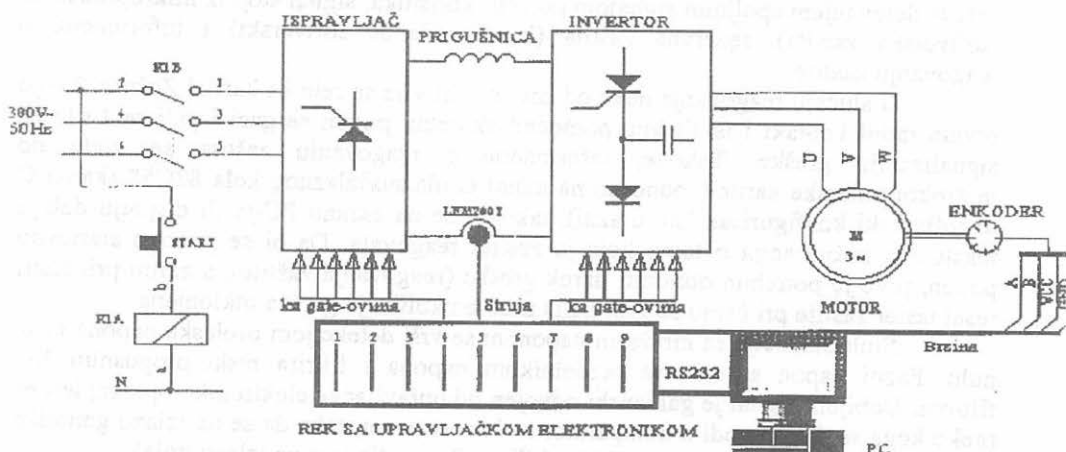
Aleksandar Nikolić, *ENERGOPROJEKT ENTEL D.D.*  
Borislav Jeftenić, *Elektrotehnički fakultet u Beogradu*

*Sadržaj:* U radu je dat prikaz realizacije asinhronog pogona sa mikroprocesorski upravljanim strujnim pretvaračem učestanosti na bazi mikrokontrolera INTEL 80C196KC. Pod strujnim pretvaračem učestanosti podrazumevamo tiristorski punoupravljivi ispravljač, jednosmerno međukolo sa induktivnim filterom i tiristorski inverter sa zaprečnim diodama i autosekvencijalnom komutacijom. Ova konfiguracija je pogodna za napajanje motora većih snaga, gde je značajno vraćati energiju u mrežu pri kočenju. Pogon je u potpunosti realizovan u Laboratoriji za elektromotorne pogone Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, gde se i vrše ispitivanja.

*Ključne reči:* asinhroni motor / strujni inverter / mikroprocesorsko upravljanje

### 1. UVOD

Projekat ovog pogona je zasnovan na određenim teorijskim razmatranjima i analizama režima rada asinhronog motora sa strujnim inverterom, sprovedenih putem simulacija na računaru u programu *MATLAB SIMULINK* ([1], [2], [3] i [4]), a sa krajnjim ciljem da se realizuje jedan nov koncept vektorskog upravljanja ovim pogonom. Blok šema pogona je data na sledećoj slici:



Sli. 1. Blok šema pogona asinhronog motora napajanog iz strujnog invertora

Pogon čine:

- 1) Tiristorski punoupravljivi ispravljač sa 6 tiristora ATS12CN, odgovarajućom RC zaštitom, prigušnicama od  $30\mu\text{H}$  za ograničavanje porasta struje i ultra brzim osiguračima sa mikropekidačima.

- 2) Prigušnica u jednosmernom kolu 20 mH.
- 3) Tiristorski strujni inverter sa autosekvencijalnom komutacijom sa: 6 tiristora SKT80, 6 dioda SKN45, odgovarajućom RC zaštitom, komutacionim kondenzatorima od 8 $\mu$ F i ultra brzim osiguračima.
- 4) Asinhroni motor 380V, 3kW.
- 5) Optički inkrementalni enkoder RON425, montiran na osovinu motora, za dobijanje informacije o brzini pogona.
- 6) Strujni modul LEM LT 200-S za merenje struje u jednosmernom kolu.
- 7) Rek sa upravljačkom elektronikom sa prekidačem za uključivanje, LED diodama za signalizaciju, tasterima za resetovanje zaštite i procesora, potrebnim priključcima za spoljne signale i 9-to pinskim konektorom za serijsku (RS232) vezu sa PC računarom.
- 8) Ostali pribor potreban za funkcionisanje uređaja: sklopka za uključivanje ispravljača na mrežu, pomoćna sklopka zaštite, tasteri za puštanje u rad i transformatori za napajanje elektronike.

## 2. OPIS UPRAVLJAČKOG DELA POGONA

Upravljanje pogonom obavlja mikrokontroler Intel 80C196KC sa pratećom upravljačkom elektronikom smeštenom u industrijski 19-to inčni rek na 9 kartica EVROPA formata: *Napajanje, Zaštita 1 i 2, Sinhronizacija, Pojačavači impulsa 1 i 2, Interfejs TTL-CMOS, Mikrokontroler i Interfejs za merenje.*

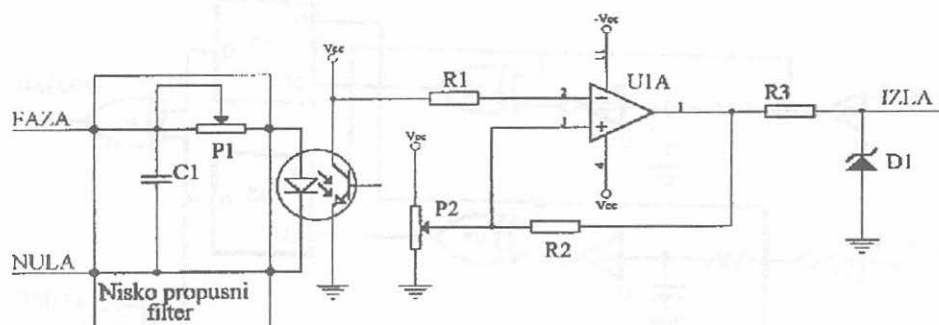
Kartica *Napajanje* obezbeđuje potrebne napone nivoa +5V (za mikrokontrolersku karticu),  $\pm 12V$  (za operacione pojačavače i kola zaštite),  $\pm 15V$  i +24V (za pojačavače impulsa za paljenje tiristora).

Na karticama *Zaštita 1* i *Zaštita 2* realizovane su sledeće funkcije za zaštitu pogona od neželjenih radnih uslova: prenaponska zaštita, zaštita od pregorevanja brzih osigurača, prekostrujna zaštita, temperaturna zaštita, zaštita od nesimetrije faza, zaštita delovanjem spoljnim signalom po želji korisnika, signal stop iz mikroprocesora (softverska zaštita), rezervna zaštita (konfigurise se softverski) i informacija o reagovanju zaštite.

U slučaju reagovanja neke od zaštita, aktivira se rele na kartici *Zaštita 2* koje otvara radni kontakt i isključuje pomoćnu sklopku, pogon se gasi i pali se LED za signalizaciju greške. Takođe, informacije o reagovanju zaštite se vode do mikrokontrolerske kartice, odnosno na kanal C ulazno/izlaznog kola 82C55 (kanal C je softverski konfigurisan kao ulazni), tako da se na ekranu PC-ja ili displeju dobija tekstualna informacija o tome koja je zaštita reagovala. Da bi se ponovo startovao pogon, prvo je potrebno otkloniti uzrok greške (reagovanja zaštite), a zatim pritisnuti reset taster zaštite pri čemu se gasi LED zaštite ukoliko je greška otklonjena.

Sinhronizacija sa mrežnim naponom se vrši detekcijom prolaska napona kroz nulu. Fazni napon se snižava razdelnikom napona i filtrira nisko-propusnim RC filtrom. Dobijeni signal je galvanski odvojen od upravljačke elektronike optokaplerom preko koga se dalje uvodi u komparator sa histerezisom, tako da se na izlazu generise pravougaoni impuls nivoa oko +5V (stabilisan Zener diodom na izlazu kola).

Signal sinhronizacije se podešava pomoću dva potencijometra: sa P1 se podešava vrednost RC člana tako da se uzlazna ivica impulsa na izlazu javi tačno u trenutku prolaska međufaznog napona kroz nulu, a pomoću P2 se podešava širina histerezisa. Na kartici su realizovana tri ovakva kanala, za svaku fazu po jedan, a na sledećoj slici je dat blok dijagram sinhronizacije za jednu od faza.



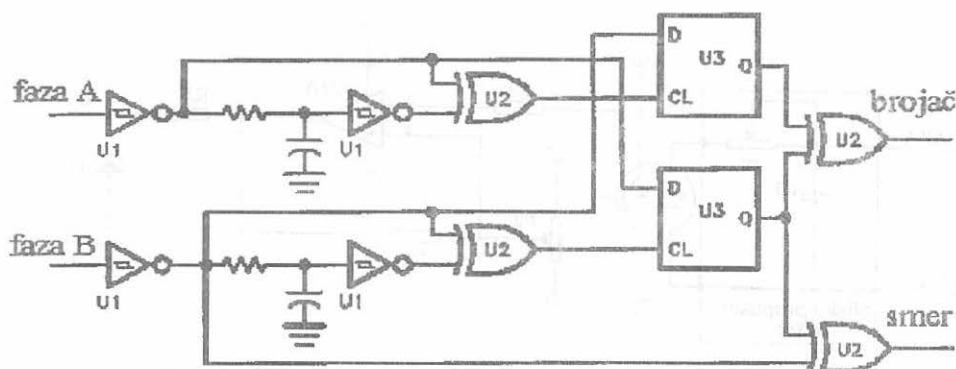
Sl. 2. Šema kola za sinhronizaciju sa mrežom (jedna faza)

Kartice pojačivača impulsa za paljenje tiristora su 6-to kanalni tranzistorski pojačivači (postoje 2 kartice) i služe za paljenje tiristora i u ispravljaču i u invertoru. Na ulazu pojačavača se održava napon od +15V, a kolo je tako konfigurisano da izlazu daje oštar impuls amplitude +24V na silaznu ivicu impulsa koji dolaze iz procesora. Pojačivači impulsa su odvojeni galvanski od energetskog dela sistema impulsnim transformatorima VAC ZKb409.

Da bi se na ulazima pojačavača impulsa dobio signal od +15V, potrebno je izvršiti prevođenje impulsa od +5V koji stižu iz procesora u nivo od +15V koji se vodi na pojačivače impulsa. Ovu funkciju obavlja kartica *Interfejs TTL-CMOS* i ima 12 kanala (6 za ispravljač i 6 za invertor). Koristi se 6-to kanalni translator nivoa MC14504B u CMOS tehnologiji (2 komada). Ovo kolo vrši translaciju TTL signala u CMOS logički signal pri bilo kom CMOS naponu napajanja između -5 i +15V. Ulaz kola je interno zaštićen diodama i nije potreban nikakav dodatni signal za sinhronizaciju ili ulaz za dizanje / spuštanje napona. Integrisano kolo MC14504B je dovoljno brzo za datu primenu (vreme kašnjenja pri uspostavljanju pojedinih naponskih nivoa je reda 300ns).

*Interfejs za merenja* služi za merenje brzine i struje u jednosmernom kolu, i prosleđivanje odgovarajućih signala procesoru. Struja se meri (metodom Hal-ovog efekta) LEM modulom koji veličinu struje smanjuje u odnosu 1:2000, a zatim se signal kolom za dobijanje apsolutne vrednosti sa ograničenjem (na bazi operacionog pojačivača) prilagođava na naponski nivo od +5V i dovodi na prvi kanal A/D konvertora u mikrokontroleru, kao i digitalna informacija o znaku struje (logička jedinica označava pozitivan smer). Kolo za dobijanje apsolutne vrednosti signala ima mogućnost prilagođenja nivoa za pozitivni i negativni ulaz pomoću 2 potencijometra, kao i otklanjanje ofseta trećim potencijometrom. Otklanjanje ofseta u spoljnjem kolu A/D konvertora značajno poboljšava preciznost merenja, jer se greška ne nagomilava pri prevođenju analognog u digitalni signal [5].

Brzina se meri inkrementalnim enkoderom RON 425, kombinovanom metodom [6], a na kartici takođe postoji i mogućnost merenja brzine pomoću tahogeneratora (princip prilagođenja naponskog nivoa je isti kao kod kola za merenje struje). Pri merenju enkoderom dobijaju se dve povorke impulsa (faze A i B) koje se iz enkodera vode na flip-flobove i XOR kola na kartici *Interfejs za merenja*, pri čemu se formiraju dva signala koja se vode u brojač 82C54 na procesorskoj kartici: takt impuls (brojač) i informacija o smeru (slika 3). Ovakvim digitalnim filtriranjem signala sa enkodera izbegavaju se greške u merenju zbog pojave ponavljanja impulsa u jednoj od faza (A ili B) pri promeni smeru obrtanja motora i pri zaustavljanju, kada dolazi do vibriranja osovine motora [7].



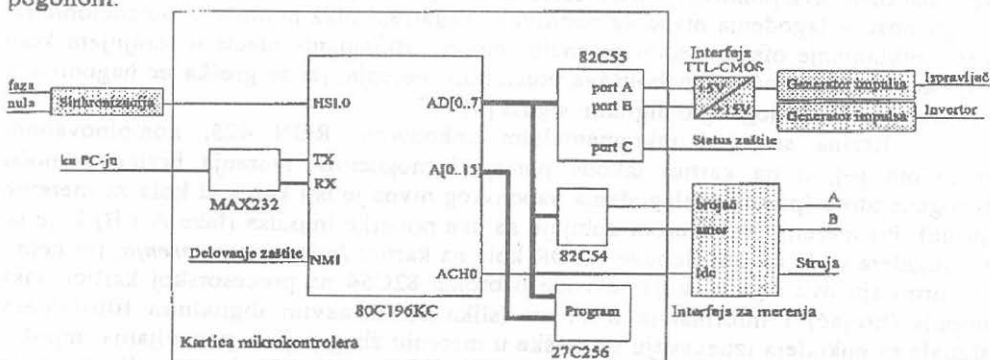
Sl. 3. Digitalni filter za vezu enkodera sa mikrokontrolerom

Procesorska kartica je realizovana na bazi 16-bitnog mikrokontrolera INTEL 80C196KC sa taktom od 16MHz, 232 bajta Registar fajla, 256 bajta dodatnog RAM-a, Registar-u-registar arhitekturom (nema akumulatora, već se direktno pristupa odgovarajućem registru, pa je veća brzina rada), integrisanim 8 kanalnim 8/10-bitnim A/D konvertorom, dva hardverska i 4 softverska 16-bitna tajmera/brojača, pet 8-bitnih ulazno-izlaznih portova sa velikim brojem različitih funkcija (konfigurišu se softverski, prema potrebi), ulazno/izlaznim podsistemom velike brzine (4 ulaza i 6 izlaza), tri 8-bitna PWM generatora, serijski port sa potpunim dupleks modom, 16-bitnim tajmerom za nadzor softvera (*watchdog*), 28 izvora prekida (*interrupt-a*) [5].

Na samoj kartici se osim mikrokontrolera nalaze:

- kola za resetovanje procesora (4093, 74LS06),
- RAM memorija 62256,
- EPROM 27C256 (u kome su smešteni program i tablice),
- adresni dekokder PAL 16L8,
- tajmer 82C54 za merenje brzine (ima tri 16-bitna brojača),
- 24-bitno ulazno/izlazno kolo 82C55 za prosledivanje impulsa za paljenje tiristora (kanali A i B) i očitavanje stanja zaštita (kanal C),
- kolo MAX232 za serijsku komunikaciju sa PC računarom,
- analogno ulazno kolo za A/D konvertor (sastoji se od 2 diode, otpornika i kondenzatora, a na ploči ima 6 ovakvih kola - za 6 kanala).

Na sledećoj slici je dat blok dijagram mikroprocesorskog upravljanja pogonom.



Sl. 4. Blok dijagram mikroprocesorskog upravljanja

### 3. ALGORITAM ZA UPRAVLJANJE POGONOM

Softver za upravljanje motorom je napisan u programskom jeziku C, korišćenjem posebnog C kompajlera optimizovanog za procesore Intelove serije 80C196. Odgovarajućom izmenom softvera mogu se dobiti različite vrste algoritama upravljanja, uključujući i vektorsko upravljanje. Startovanje pogona i zadavanje odgovarajućih referentnih vrednosti se vrši sa tastature PC računara, pomoću posebnog programa za komunikaciju.

Program za upravljanje čine sledeći moduli:

1. Glavni program (fajl CSI\_VCON.C), u kome se vrši inicijalizacija periferija sistema (serijske veze, ulazno/izlaznog kola 82C55, brze ulazno/izlazne jedinice (HSI/O), A/D konvertora) i setovanje odgovarajućih prekidnih rutina, a zatim se ulazi u beskonačnu petlju u okviru koje se vrši očitavanje statusa serijske veze (čitavanje komandi za start/stop pogona i ulaznih parametara). Iz ove petlje se izlazi pritiskom na reset taster procesora, pri čemu se na ekranu (u slučaju da je sve u redu) javlja poruka "READY". U glavnom programu se nalaze i funkcije za: startovanje pogona (poziva se sa "S" preko programa za komunikaciju i u njoj se setuju svi potrebni prekidi), promenu struje u q-osi (poziva se sa "QXXX" gde XXX predstavlja vrednost struje u %, npr. Q030 je  $i_q = 30\%$ ) i zaustavljanje pogona (poziva se sa "Z").
2. Modul za sinhronizaciju (fajl SINHRO.C). Konfigurisan je kao prekidna rutina prioriteta 4 (najniži prioritet je 0, a najviši 15) koja se startuje prilikom pojave rastuće ivice na HSI 0, ali tek nakon poziva komande "START" sa PC-ja, čime se odobrava prekid na HSI kanalu 0. U okviru modula vrši se prvo provera statusa HSI pina 0 (tj. da li je stvarno bio prekid), a zatim i provera da li se uzlazne ivice (impulsi sa kola za sinhronizaciju) javljaju u opsegu od oko 20ms (tačnije opseg je od 17ms do 23ms), što predstavlja softversku zaštitu od smetnji. Merenje vremena se računa čitanjem 16-bitnog brojača 1 (registar TIMER1) koji je hardverski sinhronizovan sa HSI jedinicom. U trenucima pojave sinhronizacionog impulsa setuje se softverski tajmer 0, tako da pokrene prekidnu rutinu za paljenje tiristora u ispravljaču za ugao paljenja  $\alpha$  (u  $\mu$ s, zadaje ga regulator struje) računato od trenutka ulaska u sinhronizaciju.
3. Modul za paljenje tiristora u ispravljaču (fajl TIR\_RECT.C). Konfigurisan je kao prekidna rutina prioriteta 5 i startuje se nakon isteka vremena zadatog sa TIMER1+ALFA u softverskom tajmeru 0. Tom prilikom se proverava da li je bio prekid, a ako jeste, u okviru petlje se postavljaju impulsi za paljenje tako što se na osnovu ugla paljenja koji zadaje regulator struje odredi prvo segment paljenja (ima ih tri: od 0 do 60°, od 60° do 120° i od 120° do 180°) i na osnovu toga pročita odgovarajuća tablica sa redosledom paljenja tiristora. Čitanje tablice se vrši u trenucima šestine periode mrežnog napona (računa se u modulu za sinhronizaciju) tako što se u tim trenucima postavi softver tajmer prekid i pročitanu vrednost (u hex kodu) pošalje na kanal A kola 82C55. Trajanje ovih impulsa je ograničeno na 10 $\mu$ s, kako bi se dobili odgovarajući impulsi za paljenje.
4. Modul za merenje struje (fajl IDC\_MER.C). U ovom programu se postavlja prekid za startovanje regulatora struje (preko softver tajmera), očitava se sa A/D konvertora vrednost struje u jednosmernom međukolu i računa njena srednja vrednost. Ukoliko je ispunjen vremenski uslov definisan u softver tajmeru, startuje se regulator struje.
5. Modul PI regulatora struje (fajl PIREG\_I.C). U ovoj prekidnoj rutini (prioritet 3), se na osnovu izmerene struje u jednosmernom međukolu i referentne struje, a pomoću klasičnog PI regulacionog algoritma određuje ugao paljenja. Referentna struja se dobija na osnovu zadatih struja u q-osi i d-osi (zadaju se sa računara)

čitanjem tablice koja predstavlja resolver, tj. transformaciju iz Dekartovih u polarne koordinate:

$$i_s^* = \sqrt{(i_{ds}^*)^2 + (i_{qs}^*)^2} \quad (1)$$

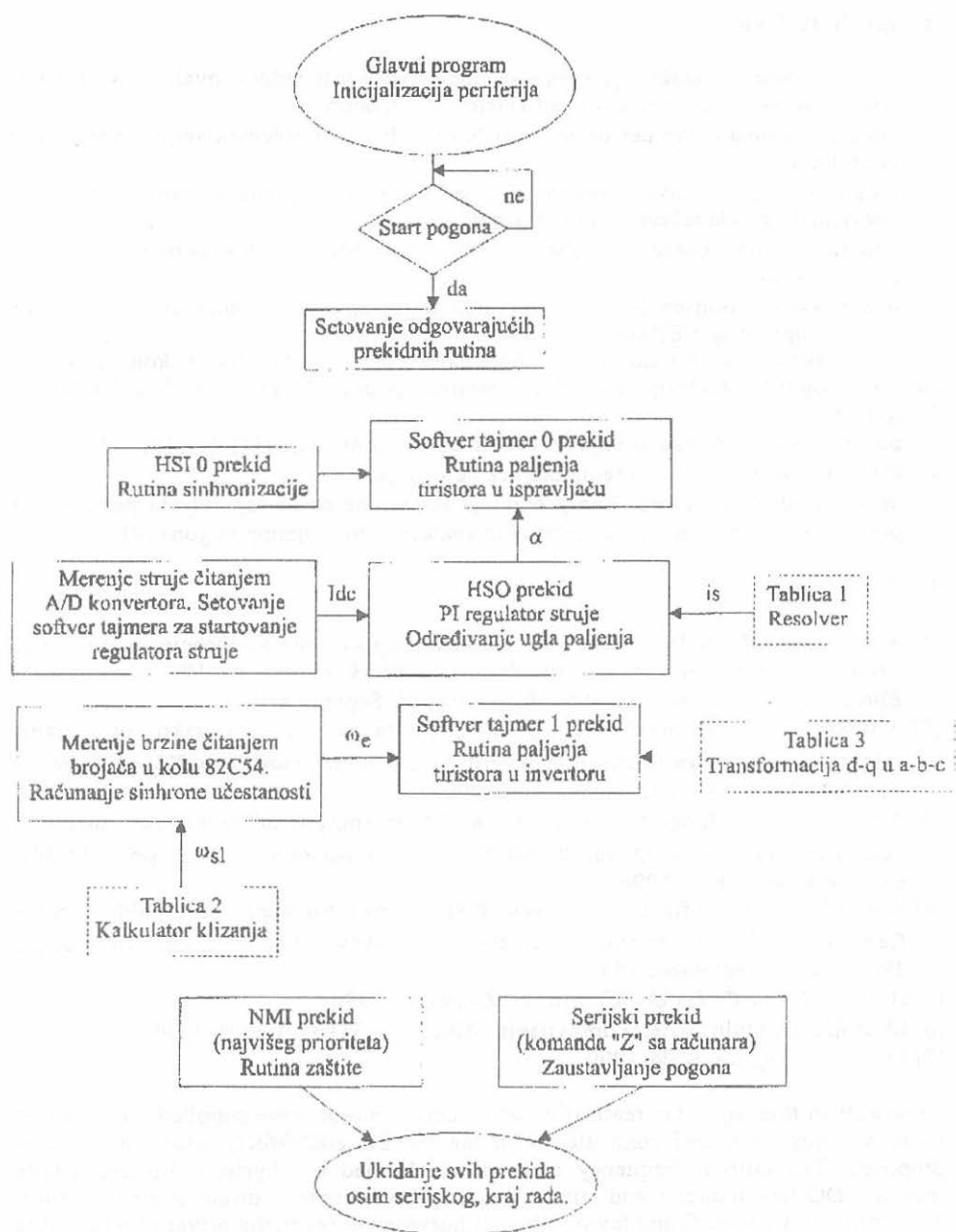
Kao rezultat PI algoritma, dobija se komandna veličina  $U_c$  na osnovu koje se dobija ugao paljenja, po formuli (predstavljenoj u tabličnoj formi):

$$\alpha = \arccos(U_c) \quad (2)$$

6. Modul za merenje brzine (fajl W\_MER.C). Brzina se računa kombinovanom metodom [6], a merenje se obavlja pomoću kola 82C54 koje u sebi poseduje tri 16-bitna brojača. Brzina obrtanja se određuje na sledeći način: Na CLOCK ulaz prvog brojača dovode se takt impulsi sa enkodera, a na GATE impuls sa mikroprocesora za startovanje brojanja. Na ovaj način se čita broj impulsa  $M$  u periodu odabiranja  $T$ . Perioda odabiranja se određuje kao razlika vremenskih trenutaka  $T_2$  i  $T_1$ , gde je  $T_1$  vreme pojave prvog impulsa sa enkodera, a  $T_2$  vreme pojave poslednjeg impulsa. Vreme  $T_2$  određuje brojač 3 koga enkoder stalno okida, a u željenom trenutku se čita vrednost, dok vreme  $T_1$  određuje brojač 2. Izračunata vrednost brzine se sabira sa brzinom klizanja  $\omega_{sl}$  zadatom u kalkulatoru klizanja (u vidu tablice) i dobija se sinhrona brzina  $\omega_e$ .
7. Modul za paljenje tiristora u invertoru (fajl TIR\_CSI.C). Konfigurisan je kao prekidna rutina prioriteta 5 koja se poziva prekidom softver tajmera 1. Tablica za paljenje se određuje na osnovu zadatih struja  $u$  q i d-osi i sinhrono učestanosti  $\omega_e$  (transformacija d-q u trofazni sistem, takođe predstavljena tablično). Tri jedinične sinusoide (dobijene iz prethodne tablice) se uvode u komparator nivoa 0.5, kako bi se dobilo vreme vođenja tiristora od  $120^\circ$ . Na ovaj način se formira tablica za paljenje tiristora i vrednost pročitana iz tablice (u hex kodu) pošalje na kanal B kola 82C55.
8. Modul zaštite (fajl ZASTITA.C) je konfigurisan kao prekidna rutina najvišeg prioriteta (15) koja se ne može softverski isključiti (*NMI-Non Maskable Interrupt*) što je omogućeno hardverskom konfiguracijom mikrokontrolera i u slučaju pojave signala reagovanja zaštite, sve ostale rutine se prekidaju i prelazi se na ovu rutinu. U okviru ovog modula se vrši očitavanje statusa zaštite (čitanje porta C kola 82C55) i serijskom vezom se prosleđuje na ekran informacija o tome koja je zaštita reagovala.

Svi gore navedeni fajlovi su prevedeni i povezani sa odgovarajućim bibliotekama funkcija i dobijeni binarni fajl je preveden u Intel hex format, radi upisa u EPROM.

Na sledećoj slici je predstavljen blok dijagram softvera za vektorsko upravljanje navedenim pogonom.



Sl. 5. Blok dijagram programa za upravljanje pogonom

#### 4. ZAKLJUČAK

Na osnovu izloženog, mogu se uočiti prednosti jednog ovakvog pogona sa mikroprocesorskim upravljanjem nad klasičnim pogonom:

- poboljšane dinamičke performanse sistema dobijene implementacijom vektorskog upravljanja,
- mogućnost jednostavne rekonstrukcije postojećih pogona samo zamenom upravljačkog dela rekom sa mikrokontrolerom,
- pojednostavljeno održavanje pogona zbog smanjenog broja komponentata i njihove modularnosti,
- jednostavna modifikacija i nadogradnja algoritma upravljanja samo izmenom softvera upisanog u EPROM.

Takode, planirano je i dalje usavršavanje laboratorijskog prototipa realizovanog u Laboratoriji za za elektromotorne pogone Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu:

- provera teorijskih razmatranja izvedenih putem simulacija ([1], [2], [3] i [4]),
- primena *fuzzy* logike za regulatore brzine i struje,
- primena neuralnih mreža kod predikcije referentne struje ispravljača potrebne za prevazilaženje sporog odziva momenta vektorski upravljano pogona [4].

#### LITERATURA

- [1] A.B.Nikolić, B.I.Jeftenić: Analiza vektorskog upravljanja asinhronim pogonom sa strujnim inverterom pomoću simulacije, *Zbornik radova sa VIII simpozijuma Energetska elektronika*, pp. 495+502, Novi Sad, Septembar 1995.
- [2] A.B.Nikolić, S.Milosavljević: Uticaj komutacije na vektorsko upravljanje asinhronim pogonom sa strujnim inverterom, *Zbornik radova sa XL konferencije za ETRAN*, pp. 639+642, Budva, Jun 1996.
- [3] A.B.Nikolić, B.I.Jeftenić: Computer Simulation Analysis of Vector Controlled CSI Fed Induction Motor Drive, *PEMC'96 Conf. Proceedings vol.2*, pp. 537-541, Budapest, September 1996.
- [4] A.B.Nikolić, B.I.Jeftenić: The New CSI Control Strategy for Avoiding Slow Response in Vector Controlled Induction Motor Drive, *EPE'97 Conf. Proceedings*, Trondheim, September 1997.
- [5] INTEL: *16-bit Embedded Controller Handbook*, 1990
- [6] M.Stojić: Digitalni sistemi upravljanja, *Nauka*, pp.33+34, Beograd 1990
- [7] INTEL: *Using the 8096*, 1990

**Abstract:** In this paper the realization of induction motor drive supplied with current frequency converter and controlled with the INTEL 80C196KC microcontroller is proposed. The current frequency converter is formed by thyristor 3-phase bridge rectifier, DC link inductor and autosequentially commutated current source inverter. This configuration has found favor in higher horsepower reversing drives to which it is well suited. The drive is entirely realized in Electrical Drives Laboratory of Belgrade Electrotechnical Faculty, where it was tested.

### THE REALIZATION OF MICROPROCESSOR CONTROLLED CSI SUPPLIED INDUCTION MOTOR DRIVE

Aleksandar Nikolić, Borislav Jeftenić